

ФМБА РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное
учреждение**

"Государственный научный центр

Российской Федерации -

Федеральный медицинский

биофизический центр имени

А.И. Бурназяна"

(ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)

123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46

Тел (499) 190-85-58

E-mail: fmbsc@fmbamail.ru

ОКПО 85667361, ОГРН 1087746355498

ИНН/КПП 7734581136/773401001

30.09.2026

№

01-49/4098

На № 435-09/3394 от 17.08.2026

О направлении отзыва на диссертацию
А.В. Берлянда

Уважаемый Андрей Николаевич!

Направляю Вам отзыв официального оппонента, главного научного сотрудника ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России Ключкова Владимира Николаевича, на диссертацию Берлянда Александра Владимировича на тему: «Совершенствование системы обеспечения единства измерений поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц», представляемую на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение.

Приложение: Отзыв на 22 страницах.

Заместитель генерального директора
по науке – начальник управления
радиационной медицины



А.Ю. Бушманов

Исп. Ключков Владимир Николаевич
vnklochkov22@mail.ru
тел. (499) 190-95-44, (910) 435-80-89

ФГУП «ВНИИФТРИ»	
Вх. №	9899
«01»	10 2026 г.
на	1 лист
приложение на	22 листах

ОТЗЫВ

официального оппонента КЛОЧКОВА Владимира Николаевича

главного научного сотрудника

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России

доктора технических наук

на диссертационную работу БЕРЛЯНДА Александра Владимировича по теме
«Совершенствование системы обеспечения единства измерений
поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и
энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц»,
представляемую на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Соискатель ученой степени доктора технических наук А.В. Берлянд представил диссертацию в виде специально подготовленной рукописи, написанной единолично. Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ФГУП «ВНИИФТРИ»). Научный консультант – доктор физико-математических наук Ю.Е. Титаренко.

Диссертантом сформулирована **основная цель работы**: обеспечение единства измерений поглощенной дозы низкоэнергетического рентгеновского, протонного, ионного излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц в соответствии с современными требованиями в научной, медицинской и космической отраслях в Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели диссертантом определены **4 задачи**, которые необходимо решить:

1. Провести анализ существующей системы обеспечения единства измерений поглощенной дозы разных видов излучений, энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц.

2. Разработать требования к методам и средствам воспроизведения и передачи рассматриваемых в работе единиц величин, которые обеспечивают метрологическую прослеживаемость результатов измерений.

3. Выбрать и обосновать научно-технические решения, обеспечивающие воспроизведение и передачу рассматриваемых единиц величин.

ФГУП «ВНИИФТРИ»	
Вх. №	9899
«9»	10 2026 г.
№	1
лист	22

4. Разработать метод и средства определения соотношений энергий и пробегов тяжелых заряженных частиц.

Тема диссертационной работы А.В. Берлянда является безусловно актуальной.

К моменту начала выполнения диссертационной работы в Российской Федерации единство измерений поглощенной дозы обеспечивал Государственный первичный эталон ГЭТ 38-95, позволяющий обеспечить прослеживаемость результатов измерений только для излучения радионуклидных установок дистанционного облучения. Остальные виды излучения, применяемые при лучевой терапии, – рентгеновское излучение терапевтических аппаратов, пучки протонов и ионов углерода, излучение брахитерапевтических источников – прослеживаемостью к первичному эталону обеспечены не были. Между тем требования к точности измерений в клинической дозиметрии являются наиболее высокими среди всех областей применения ионизирующих излучений: для успеха лучевой терапии погрешность значения поглощенной дозы не должна превышать 3 %, тогда как погрешности применявшихся методов достигали для отдельных видов излучения 8 %, а в брахитерапии расширенная неопределенность дозовой постоянной достигает 9–10 % ($k = 2$).

В очень актуальной области испытаний электронной компонентной базы на радиационную стойкость отсутствие эталонов энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц приводило к применению на испытательных стендах несогласованных между собой методов и средств измерений, вследствие чего результаты испытаний оказывались несопоставимыми между испытательными центрами при нормируемом пределе погрешности 10 %.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 381 странице машинописного текста. Список литературы включает 282 наименования. Работа иллюстрирована 102 рисунками и 33 таблицами, содержит 6 приложений.

Структура диссертации в полной мере соответствует решению сформулированных автором перечисленных выше задач.

В первой главе диссертации в ходе решения **первой задачи** представлен подробный и глубокий литературный обзор, направленный на решение первой задачи и содержащий анализ методов и средств определения поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучения и излучения, а также анализ методов и средств определения флюенса, плотности потока и энергии протонного излучения и тяжелых заряженных частиц.

Решение **второй и третьей задач** содержат последующие главы диссертации, в которых изложены результаты разработки методов и научно-технических решений, обеспечивающих воспроизведение и передачу:

единицы поглощенной дозы низкоэнергетического фотонного излучения (глава 2);

единицы поглощенной дозы протонного и ионного излучений (глава 3);

единицы поглощенной дозы излучения при брахитерапии (глава 4);

единиц флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц (глава 5);

единицы энергии тяжелых заряженных частиц (глава 6).

Решению **четвертой задачи** по разработке методов и средств определения соотношений энергия-пробег тяжелых заряженных частиц посвящена седьмая глава.

По итогам первой главы намечены и обоснованы задачи проведения исследований и намечены основные задачи и пути их решения.

По итогам последующих глав сформулированы краткие заключения, из которых логично вытекают положения, выносимые на защиту.

В целом структура диссертации, несмотря на очень большой текстовый материал, обилие формул и различных иллюстраций, представляется очень четкой, понятной и обоснованной. Четкая структура диссертации позволяет более четко понять масштаб и детали выполненной работы.

Во **Введении** проанализировано состояние системы обеспечения единства измерений параметров ионизирующих излучений применительно к ядерной медицине и испытаниям электронной компонентной базы, на основе чего выявлено противоречие между состоянием отечественной эталонной базы и современными требованиями к точности и прослеживаемости

измерений. Обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость темы, достоверность результатов, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследований, представлены положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, докладах и публикациях.

Следует отметить, что информация о личном участии автора изложена корректно и предметно: диссертант разграничивает результаты, полученные им лично, и результаты, полученные под его руководством.

В **Главе 1** «Анализ методов и средств определения поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучения и излучения при брахитерапии. Анализ методов и средств определения флюенса, плотности потока и энергии протонного излучения и тяжелых заряженных частиц» на основе анализа литературных источников рассмотрены основные классы средств измерений: полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы, термолюминесцентные детекторы, ионизационные камеры, калориметры, трековые детекторы, алмазные детекторы, а также методы определения энергии, флюенса, плотности потока и пробега частиц.

Анализ носит содержательный характер: по каждому классу средств измерений выделены принципиальные ограничения. Диссертант справедливо отмечает, что различные типы дозиметров дают расходящиеся показания в низкоэнергетических рентгеновских полях вследствие сильной зависимости отклика от энергии фотонов и наличия градиента дозы, а применение ионизационных камер в пучках ионов приводит к систематическому занижению дозы на 2–6 % относительно прямых калориметрических измерений. Итогом работ, описанных в главе 1, является научно обоснованный план работ по теме диссертации.

Глава 2 «Разработка методов и средств воспроизведения единицы поглощенной дозы низкоэнергетического фотонного излучения» посвящена решению задачи, для которой прямые калориметрические методы практически неприменимы из-за крайне малого пробега низкоэнергетических фотонов. Обоснован и реализован ионометрический метод с применением разработанной плоскопараллельной экстраполяционной ионизационной

камеры, конструкция которой обоснована конечно-элементным анализом (COMSOL Multiphysics) и моделированием методом Монте-Карло (Geant4, MCNP).

Несомненным преимуществом разработанной конструкции является применение сменных входных окон из графитизированной полиэтилентерефталатной пленки толщиной 4 и 10 мкм, что позволяет минимизировать ослабление первичного пучка и проводить измерения на глубине 7 мг/см² в водном эквиваленте. Использование тканеэквивалентных материалов (полиметилметакрилат, полиоксиметилен) позволяет определять дозу непосредственно в воде. Предусмотрена возможность монтажа сменного входного окна толщиной 350 мкм: это позволяет напрямую сопоставить показания камеры с графитовым калориметром из состава государственного первичного эталона при энергии 15 кэВ, то есть обеспечивает «сшивку» двух независимых методов на границе диапазонов. Такое решение является методически обоснованным и существенно повышает доверие к результатам.

Экспериментально определены эффективная площадь собирающего электрода (7,163 см² при относительной стандартной неопределенности 0,3 %) и действительное значение нулевого зазора между электродами (0,096 мм). Важным самостоятельным результатом главы является усовершенствованный метод восстановления реального спектра рентгеновского излучения: вместо последовательного вычитания вкладов аппаратурных искажений реализована гибридная схема, объединяющая моделирование методом Монте-Карло и алгоритмы регуляризованной развертки с формированием непрерывной матрицы отклика детектора.

По результатам исследований, изложенных в главе 2, на защиту вынесено первое положение:

Применение графитизированных полиэтилентерефталатных пленок разной толщины в конструкции разработанной экстраполяционной ионизационной камеры в совокупности с применением усовершенствованного метода определения реального спектра обеспечивает определение поглощенной дозы рентгеновского излучения в воде для энергий от 5 до 15 кэВ с расширенной неопределенностью не более 2,7 % ($k = 2$).

Глава 3 «Разработка методов и средств воспроизведения единицы поглощенной дозы протонного и ионного излучений» посвящена разработке квазиadiaбатических графитовых калориметров. Выбор калориметрического подхода обоснован убедительно: ионометрический метод, регламентированный международным стандартом по дозиметрии в области радиотерапии TRS-398, ограничен по точности высокой неопределенностью средней энергии ионообразования в воздухе и отношений тормозных способностей для тяжелых частиц.

Заслуживает внимания примененная диссертантом методика определения оптимальных геометрических параметров: рассчитанное методами Монте-Карло (Geant4, PHITS, FLUKA) трехмерное распределение поглощенной энергии использовалось далее в качестве источника тепловыделения для конечно-элементного моделирования теплопереноса (COMSOL, ANSYS). Такая последовательная связка радиационно-физической и тепловой задач позволила подобрать конфигурацию, минимизирующую температурные градиенты и тепловые потери. Подробно проанализированы и количественно оценены эффекты, влияющие на значение поглощенной дозы: искажение флюенса вакуумными зазорами, потери тепла по подводящим проводам.

Важным результатом является подход к уточнению отношений массовых тормозных способностей: данные ICRU 49, ICRU 73, ICRU 90, баз PSTAR и кодов SRIM/MSTAR приведены к единым физическим параметрам – плотности кристаллического графита $2,265 \text{ г/см}^3$ и среднему потенциалу ионизации 81 эВ, – после чего итоговые значения определены взвешенным усреднением со статистическим весом, обратно пропорциональным квадрату заявленной неопределенности источника. Это позволило достичь неопределенности средневзвешенных значений тормозной способности 0,35 %. Следует особо отметить полученный количественный результат: переход к значениям потенциала ионизации графита в соответствии с ICRU 90 снижает расчетные значения тормозной способности на 3–4 % в высокоэнергетической области, а в интервале 0,1–1 МэВ корректирует значения для протонов на 1–2 %. Достоверность результатов моделирования

подтверждена сопоставлением кодов Geant4, FLUKA и PHITS: разброс не превысил 0,1 %.

По результатам исследований, изложенных в главе 3, на защиту вынесено второе положение:

Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении уточненных отношений тормозных способностей, обеспечивает воспроизведение поглощенной дозы протонного и ионного излучений в графите для энергий от 30 до 1000 МэВ с неисключенной систематической погрешностью не более 0,9 %, средним квадратическим отклонением не более 0,4 % и определение поглощенной дозы в воде с расширенной неопределенностью 1,9 % ($k = 2$).

Глава 4 «Разработка методов и средств воспроизведения единицы поглощенной дозы излучения при брахитерапии» посвящена задаче, наиболее сложной в конструктивном отношении: точка определения дозы находится в одной среде с высокоактивным источником на расстоянии 1 см от него, что обуславливает высокие градиенты дозы и неравномерное облучение поглотителя, а самонагрев источника приводит к искажению калориметрической кривой.

Обоснована и реализована концентрическая конструкция калориметра с кольцевым графитовым поглотителем в форме цилиндрического тора толщиной 2 мм, высотой 5 мм и радиусом 25 мм. Выбранные решения представляются обоснованными: геометрия обеспечивает пространственное усреднение поглощенной энергии и минимизирует градиент дозы по толщине, а центральный алюминиевый источникопровод отводит тепло от источника за пределы чувствительной области. Важным результатом является выявленная и физически корректно интерпретированная немонотонная зависимость поправки на искажение флюенса фотонов вакуумными зазорами от энергии излучения (от 1,0014 для ^{60}Co до 1,0275 для ^{131}Cs с последующим снижением до 1,0120 для ^{103}Pd , где в графите начинает доминировать фотоэлектрическое поглощение).

Разработан метод перехода к поглощенной дозе в воде с применением ионизационной камеры и специализированных наборов графитового и водного фантомов со сменными вставками. Принципиальное значение имеет то, что предложенный подход позволяет отказаться от косвенной схемы калибровки брахитерапевтических источников через мощность воздушной кермы с применением дозовой постоянной и обеспечивает снижение расширенной неопределенности с 9–10 % до 3,2 % ($k = 2$) для источников с энергией фотонов менее 100 кэВ и до 1,2 % – для источников более высоких энергий. На основе полученных результатов разработана методика измерений (приложение 6), обеспечивающая в клинических условиях относительную расширенную неопределенность не более 3 % для источников ^{192}Ir , ^{137}Cs и ^{60}Co и не более 5 % для источников ^{103}Pd , ^{125}I и ^{131}Cs при $k = 2$. С точки зрения радиационной медицины это наиболее значимый практический результат работы.

По результатам исследований, изложенных в главе 4, на защиту вынесено третье положение:

Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении массовых коэффициентов поглощения энергии, уточненных для брахитерапевтических условий, обеспечивает воспроизведение поглощенной дозы излучения при брахитерапии в графите с неисключенной систематической погрешностью не более 0,9 %, средним квадратическим отклонением не более 0,4 % и определение значения поглощенной дозы в воде с расширенной неопределенностью не более 3,2 % ($k = 2$).

Глава 5 «Разработка методов и средств воспроизведения единиц флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц» посвящена разработке эталонного комплекса измерителей на основе цилиндров Фарадея с набором коллиматоров. Выбор метода обоснован: при полном поглощении частиц и подавлении вторичной эмиссии отклик детектора определяется только суммарным зарядом, что устраняет зависимость от типа и энергии ионов и исключает эффекты рекомбинации. Тем самым обеспечивается прослеживаемость результатов к государственным первичным эталонам

электрического заряда и тока – решение, с метрологической точки зрения принципиально более чистое, чем применявшиеся ранее подходы.

Для минимизации влияния электронов, выбиваемых пучком из входного окна, по результатам моделирования траекторий разработано охранный кольцо с регулируемым смещающим потенциалом (до минус 500 В), перехватывающим электроны с энергиями до 5 кэВ, а для подавления высокоэнергетических δ -электронов предусмотрены постоянные магниты с индукцией 0,3–0,4 Тл. Толщины стаканов определены расчетом пробегов в SRIM/TRIM и GEANT4, выполнен тепловой расчет в ANSYS, обоснованно учтена необходимость обеспечения радиационной безопасности вследствие возникновения вторичного нейтронного и гамма-излучения при ядерных реакциях. Помимо вошедших в состав эталона цилиндров Фарадея, разработаны сопутствующие средства измерений: ионизационная камера для пучков протонов, многослойные цилиндры Фарадея для оперативного получения кривых Брэгга и водные фантомы.

По результатам исследований, изложенных в главе 5, на защиту вынесено четвертое положение:

Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение флюенса и плотности потока частиц ТЗЧ с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

Глава 6 «Разработка методов и средств воспроизведения единицы энергии тяжелых заряженных частиц» посвящена реализации подхода, основанного на совместном применении калориметра полного поглощения для определения полной энергии пучка и цилиндра Фарадея для определения количества частиц. В отличие от косвенных методов, такой подход напрямую связывает результаты измерений с базовыми единицами, что для эталона является существенным преимуществом.

Сравнительный анализ материалов поглотителя выполнен по трем сформулированным диссертантом критериям – полное поглощение пучка при

меньшей толщине, минимальное время выравнивания температуры и высокий относительный прирост температуры, – на основании чего обоснован выбор меди толщиной 7 см в форме усеченного конуса. Оригинальным является решение для тяжелых ионов с малыми пробегами: двухслойный поглотитель «свинцовая фольга 100 мкм – молибденовая подложка». Созданные опытные образцы прошли проверку на медицинском протонном ускорителе, исследовательском циклотроне и на циклотроне У-400-Н Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флёрва Объединенного института ядерных исследований в пучках ионов Ar, Kr и Xe.

По результатам исследований, изложенных в главе 6, на защиту вынесено пятое положение:

Разработанный аппаратный комплекс, основанный на применении методов моделирования для определения оптимальных параметров первичных преобразователей и поправочных коэффициентов, обеспечивает воспроизведение энергии тяжелых заряженных частиц с расширенной неопределенностью не более 2,4 % ($k = 2$).

Глава 7 «Разработка методов и средств определения соотношений энергия-пробег тяжелых заряженных частиц» посвящена задаче, имеющей, в том числе, прямое клиническое значение: значение пробега частиц определяет глубину проникновения излучения в тело человека и является основой при планировании облучения, а ошибка в значениях пробегов может приводить к погрешности значения поглощенной дозы в 10–15 %. Диссертант рассматривает применяемые в клинической практике индексы R_{80} и R_{90} и обоснованно приходит к выводу, что для высокоточных измерений более целесообразен критерий, при котором за пробег принимается глубина, на которой флюенс частиц составляет 50 % от начального значения за вычетом частиц, выбывших в результате ядерных реакций.

Разработаны устройства поглотителей переменной толщины: для протонов – водяной поглотитель с шагом регулировки 0,05 мм, выбор водной среды обоснован возможностью плавного изменения толщины, теплофизическими свойствами и низкой радиационной опасностью

образующихся нуклидов ^{15}O и ^{11}C ; для короткопробежных тяжелых ионов – устройство дискретной смены фильтров на двух вращающихся дисках, обеспечивающее 36 комбинаций толщин с максимальной плотностью экспериментальных точек в области половинного флюенса и управляемое дистанционно, без разгерметизации вакуумной камеры ускорителя. Предложена оригинальная аппроксимирующая функция, учитывающая страгглинг (разброс) пробега, многократное рассеяние и потери на ядерные реакции. Достоверность показаний цилиндра Фарадея оценена двумя независимыми способами – радиационным и электрическим, с разрядом эталонного конденсатора, – что заслуживает положительной оценки.

Экспериментально определены пробеги протонов в воде в диапазоне энергий от 100 до 250 МэВ, и результаты сопоставлены с расчетными данными ICRU 90, NIST PSTAR, ATIMA, SRIM и PHITS. Сама постановка такого сопоставления имеет самостоятельное научное значение: прямых экспериментальных проверок табличных значений пробегов, выполненных на эталонном уровне с прослеживаемостью к единицам заряда и энергии, в настоящее время крайне мало, а результаты расчетных кодов для ионов с высоким атомным номером в области единиц МэВ/нуклон, как обоснованно отмечает диссертант в разделе 7.1.1, расходятся между собой существенно.

По результатам исследований, изложенных в главе 7, на защиту вынесено шестое положение:

Совместное применение разработанных калориметров полного поглощения и цилиндров Фарадея с устройствами поглотителей переменной толщины, обеспечивает определение значений пробегов протонов и тяжелых заряженных частиц с расширенной неопределенностью не более 2,4 %, определение экспериментального соотношения энергий и пробегов с расширенной неопределенностью не более 5 %.

В **Заключении** кратко изложены основные положительные результаты диссертационной работы, приведена действующая государственная поверочная схема с указанием ветвей, добавленных или обновленных в

результате работы. Этот раздел в целом объективно отражает содержание диссертационной работы.

Оценивая в целом диссертационную работу А.В. Берлянда, следует констатировать:

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечена анализом данных, опубликованных в научной литературе, проведением расчетов с использованием различных математических и эмпирических моделей, сопоставлением расчетных материалов и данных, полученных непосредственными измерениями. Достоверность результатов моделирования подтверждена перекрестной верификацией независимыми программными кодами (Geant4, FLUKA, PHITS) с расхождением не более 0,1 %. Для экспериментальных работ использовались поверенные и калиброванные высокоточные средства измерений утвержденного типа и аттестованное программное обеспечение, а проверка выполнена на независимых ускорительных базах – протонном комплексе «Прометеус», исследовательском протонном циклотроне и циклотроне У-400-Н Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флёрва Объединенного института ядерных исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами государственных испытаний и утверждением разработанного комплекса в качестве Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

Новизна представленных в диссертации материалов обеспечена новыми оригинальными подходами, использованными при проведении измерений и анализе данных.

Впервые на основе совместного физико-математического моделирования взаимодействия излучения с веществом и процессов теплопереноса установлены количественные закономерности влияния конструктивных и радиационно-физических факторов в квазиadiaбатических графитовых калориметрах при облучении протонами с энергией до 1000 МэВ и ионами углерода до 430 МэВ/нуклон, а для условий брахитерапии – количественные зависимости процессов теплопереноса и распределения

поглощенной энергии в калориметре концентрического типа с учетом градиентов мощности дозы и собственного нагрева высокоактивного источника.

Впервые решена задача дозиметрии слабопроникающего рентгеновского излучения в диапазоне 5–15 кэВ на глубине 7 мг/см². Впервые установлены закономерности формирования теплового отклика в калориметрах полного поглощения, что позволило реализовать абсолютное воспроизведение единицы энергии тяжелых заряженных частиц, и уточненные закономерности влияния вторичной электронной эмиссии и неполного сбора заряда в цилиндрах Фарадея, обеспечившие прослеживаемость измерений флюенса и плотности потока к государственным первичным эталонам электрического заряда и тока.

Впервые в Российской Федерации на уровне государственного первичного эталона создан аппаратно-методический комплекс, объединяющий применение калориметров полного поглощения, цилиндров Фарадея и устройств поглотителей переменной толщины, что позволило получить метрологически прослеживаемые соотношения «энергия–пробег» и обеспечить экспериментальную верификацию данных международных баз ICRU, SRIM, NIST.

Личный вклад диссертанта в разработку научной проблемы заключается в том, что им лично сформулирована проблематика исследования, поставлены цели и задачи исследования, разработаны методы проведения экспериментов, выполнены расчеты и анализ всех полученных результатов экспериментов. Диссертант лично принимал участие в совершенствованиях государственного первичного эталона и в разработке государственных поверочных схем. Диссертация написана автором самостоятельно. Вклад соискателя является первостепенным во всех главах диссертационной работы.

Личное участие диссертанта и его большой вклад в решение важных задач подтверждается Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 февраля 2024 года № 277, которым Берлянд Александр Владимирович утверждён учёным-хранителем Государственного

первичного эталона единиц поглощённой дозы и мощности поглощённой дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжёлых заряженных частиц (ГЭТ 38-2024). ГЭТ 38-2024 хранится в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ).

Практическая значимость работы обусловлена тем, что обеспечено воспроизведение поглощенной дозы рентгеновского, протонного и ионного излучений, а также единиц энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц, и реализованы методы передачи единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы в воде клиническим дозиметрам с необходимой для качественного лечения пациентов точностью.

Разработанный измерительный аппаратурно-методический комплекс вошел в состав Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024. Проведено три последовательных совершенствования ГЭТ 38 – в 2011, 2021 и 2024 гг. (приказы Росстандарта № 294 от 03.05.2012, № 68 от 02.02.2021, № 277 от 02.02.2024), в результате которых нижняя граница энергетического диапазона воспроизведения единицы поглощенной дозы фотонного излучения расширена до 15 кэВ, номенклатура видов излучений дополнена протонным и ионным излучениями в диапазоне от 30 до 1000 МэВ, а номенклатура воспроизводимых единиц – энергией, флюенсом и плотностью потока тяжелых заряженных частиц. Последовательно разработаны и внедрены три государственные поверочные схемы (ГОСТ 8.070-2014, приказы Росстандарта № 2359 от 26.09.2022 и № 2273 от 26.09.2024).

Разработанные эталонные средства включены в комплекс эталонной аппаратуры при выполнении ОКР «Система-2020» по заданию Росстандарта (государственный контракт № 120-86/2020). Проведены испытания с целью утверждения типа универсального дозиметра поглощенной дозы и предварительные испытания эталонных измерителей энергии и флюенса тяжелых заряженных частиц, выполнена аттестация испытательного оборудования на базе протонного ускорителя, разработана и аттестована методика измерений «Определение мощности поглощённой дозы в воде от

брахитерапевтических источников фотонного излучения МВИ 410/0093-25», обеспечивающая в клинических условиях расширенную неопределенность не более 3 % для источников ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co и не более 5 % для источников ^{103}Pd , ^{125}I , ^{131}Cs ($k = 2$).

Таким образом можно сделать вывод, что диссертация А.В. Берлянда является **завершенной научной работой и её результаты в полном объеме внедрены в практику.**

Материалы диссертации опубликованы в научной печати. Представленный диссертантом список публикаций содержит 15 опубликованных работ, в том числе 13 публикаций в изданиях, включенных в перечень рецензируемых журналов, рекомендованных ВАК (из них 4 – категории К1, 7 – К2, 1 – К3), 7 работ индексируются в базе Scopus, 6 – в базе Web of Science. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Оппонентом проведена проверка, и установлено, что все указанные публикации присутствуют в научной информационной базе. Однако следует сделать замечание, что в списке литературы в диссертации приведены лишь 6 публикаций диссертанта.

Соответствие Паспорту специальности

Рецензируемая диссертация представлена по научной специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение» (область науки: 2. Технические науки; группа научных специальностей: 2.2. Электроника, фотоника, приборостроение и связь; отрасль науки, по которой присуждаются ученые степени: технические). Паспортом специальности установлены девять направлений исследований; диссертация соответствует следующим из них:

3. Проведение фундаментальных научных исследований по изысканию и использованию новых физических эффектов с целью создания новых и совершенствования существующих методов и средств измерений высшей точности.

Данному направлению отвечают результаты глав 2–7: установленные количественные закономерности формирования теплового отклика в

графитовых калориметрах и калориметрах полного поглощения, закономерности влияния вторичной электронной эмиссии и неполного сбора заряда в цилиндрах Фарадея, а также созданные на их основе первичные преобразователи.

5. Совершенствование системы обеспечения единства измерений и метрологической инфраструктуры страны.

Данному направлению отвечает существо решенной в диссертации научной проблемы: сформирована единая, прослеживаемая к государственному первичному эталону цепочка передачи размеров единиц от первичного эталона до рабочих средств измерений, разработаны и введены в действие три государственных поверочные схемы и аттестована методика измерений МВИ 410/0093-25.

7. Разработка и внедрение новых государственных эталонов единиц измерений величин, позволяющих существенно повысить единство и точность измерений.

Данному направлению отвечают три последовательных совершенствования Государственного первичного эталона ГЭТ 38 и утверждение разработанного комплекса в качестве Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

Сопоставление диссертации и паспорта специальности позволяет сделать вывод, что диссертация А.В. Берлянда **соответствует паспорту специальности и содержит решение научной проблемы, имеющей важное значение для области метрологии ионизирующих излучений.**

Содержание автореферата соответствует основным положениям, изложенным в диссертации.

По научной работе, выполненной А.В. Берляндом, замечаний не имеется.

По оформлению диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В диссертации использовано много сокращений и аббревиатур, но общий список сокращений отсутствует, из-за чего затруднено чтение и понимание текста. Имеются неточности в употреблении аббревиатур – иногда

аббревиатура появляется в тексте раньше её расшифровки. Например, сокращение ПММА впервые приведено на с. 54, а его расшифровка на с. 109.

Необходимо отметить проблему с аббревиатурой ПЭТ. В диссертации она использована для обозначения двух совершенно различных понятий:

ПЭТ – полиэтилентерефталат;

ПЭТ - позитрон-эмиссионная томография.

И та, и другая аббревиатуры являются общепринятыми, поэтому автору в дальнейших работах рекомендуется использовать только одно сокращение, а другой термин писать полностью.

2. Рисунок 8.1 – Государственная поверочная схема плохо читается.

3. В заголовках использованы сокращения, что не рекомендуется:

В заголовках 1.4.2, 1.4.3, 5.2, 5.2.2 – сокращение ТЗЧ;

В заголовках 2.2.1 и 2.2.2 - сокращение ЭИК

4. В оглавлении нет названий приложений.

5. В тексте диссертации имеются опечатки, причем некоторые из них затрудняют понимание существа вопроса, например:

С. 8: В зависимости от области применения дозиметрия классифицируются следующим образом....

С. 224: Если эти выбитые электроны достигают стакан ЦФ и собираются им...

Встречаются неточности в употреблении терминов, например:

С. 19: *Решена задача дозиметрии слабопроникающего рентгеновского излучения (5–15 кэВ) на радиационной глубине 7 мг/см²* - очень важная и сложная задача. Но термина «радиационная глубина» нет в официальных документах.

6. По тексту диссертации неоднократно приводится обозначение документа TRS 398, но ни разу не указан номер этого документа в списке литературы. А он там присутствует под номером [3].

Указанные замечания носят, в основном, редакционный характер, и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертационная работа Берлянда Александра Владимировича «Совершенствование системы обеспечения единства измерений поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертация по своей актуальности, научной новизне, практической значимости и достоверности научных результатов, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.10 – метрология и метрологическое обеспечение.

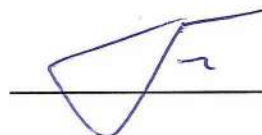
Главный научный сотрудник
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
ФМБА России, доктор технических наук,
старший научный сотрудник, доцент

 В.Н. Ключков

Подпись г.н.с. Ключкова В.Н. заверяю:

Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России
доктор медицинских наук, доцент



 С.В. Горнов

ПРИЛОЖЕНИЕ

Сведения об официальном оппоненте

по диссертационной работе БЕРЛЯНДА Александра Владимировича по теме
«Совершенствование системы обеспечения единства измерений
поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и
энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц»,
представляемую на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

Ф.И.О.:	Клочков Владимир Николаевич
Ученая степень:	Доктор технических наук
Научная специальность:	05.26.02 – Безопасность в чрезвычайных ситуациях (Ядерный топливно-энергетический комплекс) (технические науки)
Ученое звание:	Старший научный сотрудник, доцент
Место работы:	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России)
Юридический адрес:	123098, г. Москва, ул. Живописная, 46.
Почтовый адрес:	123098, г. Москва, ул. Живописная, 46.
Должность:	Главный научный сотрудник
Телефон:	+7 (910) 435-80-89
Адрес электронной почты:	vnklochkov22@mail.ru
Адрес официального сайта организации:	fmbafmbc.ru

Список основных публикаций официального оппонента

Клочкова Владимира Николаевича

по диссертационной работе БЕРЛЯНДА Александра Владимировича по теме
«Совершенствование системы обеспечения единства измерений
поглощенной дозы рентгеновского, протонного, ионного излучений и
энергии, флюенса и плотности потока тяжелых заряженных частиц»,
представляемую на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.10 – Метрология и метрологическое обеспечение

1. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., **Клочков В.Н.**, Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 1: Методы и результаты. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Том 66. № 5. С. 23–32. DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-23-32.
2. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., **Клочков В.Н.**, Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Туманов К.А., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 2: Дозы и риски. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Том 61. № 1. С. 39-45. DOI: 10.12737/1024-6177-2022-67-1-39-45
3. **V.N. Klochkov**, V.G. Barchukov, E.V. Klochkova, A.A. Maksimov, S.V. Berezin. Summary and Analysis of Russian and International Requirements for the Safe Management of very low Level Radioactive Waste and Production Waste Containing very low Active Radionuclides. Journal of Radiological Protection, 2021, Volume 41, Number 3, p. 254-268. DOI: 10.1088/1361-6498/ac0d62.
4. Грачев М.И., Саленко Ю.А., Симаков А.В., Фролов Г.П., **Клочков В.Н.**, Абрамов Ю.В., Теснов И.К. Медико-санитарные последствия радиационных аварий при обращении с отработанным ядерным топливом // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 3. С. 13–20. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-3-13-20.
5. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., **Клочков В.Н.**, Еремина Н.А., Сурип П.П., Максимов А.А., Кабанов Д.И., Величко В.К., Богданенко Н.А., Алсагаев Ж.И. Распространение углерода-14 в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Курской АЭС. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 1. С. 25–33. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33.

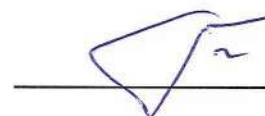
6. **В.Н. Клочков**, С.М. Шинкарев, О.А. Кочетков, В.Г. Барчуков, А.В. Симаков. К дискуссии о внесении изменений в НРБ -99/2009 и в ОСПОРБ-99/2010 // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 2. С. 95–98. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-2-95-98.
7. Самойлов А.С., Кочетков О.А., **Клочков В.Н.**, Барчуков В.Г., Шинкарев С.М. Основные направления совершенствования действующих норм и правил обеспечения радиационной безопасности. Часть 1. Масштаб проблемы и пути ее решения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 4. С. 14–19. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-14-19.
8. Симаков А.В., **Клочков В.Н.**, Абрамов Ю.В. Обоснование предложений к новым нормам радиационной безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 4. С. 20–23. DOI:10.33266/1024-6177-2023-68-4-20-23.
9. Самойлов А.С., Кочетков О.А., **Клочков В.Н.**, Барчуков В.Г., Шинкарев С.М. Развитие правовой базы в области обеспечения радиационной безопасности // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 2. С. 24–29. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-2-24-29.
10. Шандала Н.К., Самойлов А.С., Серегин В.А., Киселёв С.М., Квачева Ю.Е., Метляев Е.Г., Кочетков О.А., **Клочков В.Н.**, Титов А.В., Колышкин А.Е., Семенова М.П. Роль радиационной гигиены в обеспечении радиационной защиты и безопасности населения и персонала на примере деятельности ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 3. С. 34–47. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-3-34-47.
11. В.Г. Барчуков, **В.Н. Клочков**, О.А. Кочетков, С.М. Шинкарев, А.П. Панфилов. Радиационная безопасность персонала и населения. Исторические аспекты и современные проблемы. XII Международная научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». Сборник трудов XII Международной научной конференции «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 29–31 октября 2025 г., Москва /Под общ. ред. акад. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. - М.: ИБРАЭ РАН, 2025. 624с. Стр. 57-59.
12. Кочетков О.А., **Клочков В.Н.**, Удалов Ю.Д., Барчуков В.Г., Панфилов А.П., Симаков А.В., Шандала Н.К., Шинкарев С.М. Радиационная безопасность. Персонал. Население. Пациенты. Монография – М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2025. 264 с. ISBN 978-5-93064-383-1.

13. О работах Ордена Ленина Института биофизики Минздрава СССР по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской атомной электростанции в 1986 году. Основные результаты. Воспоминания участников ЛПА. Под редакцией кандидата технических наук, почетного профессора ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России О.А. Кочеткова. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026, 120 с. ISBN 978-5-93064-419-7. Авторы-составители: Абрамов Ю.В., Грачев М.И., Григорьев Ю.Г., Ермалицкий А.П., **Клочков В.Н.**, Симаков А.В., Титов А.В., Цовьянов А.Г., Шандала Н.К., Шинкарев С.М.

Главный научный сотрудник
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна
ФМБА России, доктор технических наук,
старший научный сотрудник, доцент

 В.Н. Клочков

Подпись г.н.с. Клочкова В.Н. заверяю:
Ученый секретарь ФГБУ ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России
доктор медицинских наук, доцент

 С.В. Горнов

