

На правах рукописи



Чипига Лариса Александровна

**ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПАЦИЕНТОВ ПРИ
ПРОВЕДЕНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ
ПОЗИТРОННОЙ ЭМИССИОННОЙ ТОМОГРАФИИ**

03.01.02 - Биофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном бюджетном учреждении науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В.Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор
Балонов Михаил Исаакович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Наркевич Борис Ярославович
президент общероссийского союза
общественных объединений
«Ассоциация медицинских физиков России»

доктор технических наук, профессор
Потрахов Николай Николаевич
заведующий кафедрой электронных
приборов и устройств,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И.Ульянова (Ленина)

Ведущая организация: ФГБУ ВО «Московский государственный
университет им. М.В. Ломоносова»

Защита состоится «19» декабря 2018 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.25 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ») по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, а также на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ».: <http://www.spbstu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук:



Линькова Наталья Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Метод позитронной эмиссионной томографии (ПЭТ) представляет собой радионуклидный метод исследования внутренних органов человека, основанный на использовании радиофармпрепаратов (РФП), меченных короткоживущими позитрон-излучающими радионуклидами, которые моделируют перенос и превращения естественных биологических веществ, участвующих в метаболизме. Диагностика онкологических, неврологических, кардиологических и др. заболеваний методом ПЭТ позволяет проводить количественный анализ биохимических или физиологических нарушений в организме пациента задолго до появления каких-либо морфологических изменений. Выявление функциональных изменений, намного опережающих анатомические, делает методы ядерной медицины уникальными как в ранней диагностике заболеваний, так и при динамическом наблюдении примененной методики лечения. Благодаря программе развития ядерной медицины за последнее десятилетие количество ПЭТ-отделений в Российской Федерации увеличилось более, чем в 5 раз, так же растет и количество пациентов, проходящих данный вид исследования.

Современные ПЭТ-аппараты совмещают с рентгеновскими компьютерными томографами, что подразумевает проведение ПЭТ-исследования совместно с компьютерной томографией (КТ). Этот метод (ПЭТ/КТ) связан с относительно высокими дозами у пациентов¹, обусловленными как внутренним, так и внешним облучением. Действующая в России Единая система контроля и учета индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД, форма 3-ДОЗ) не предусматривает отдельную регистрацию доз от данного вида диагностики, поэтому к началу проведения данной работы отсутствовала достоверная информация о режимах исследований и о дозах пациентов при проведении ПЭТ-диагностики в России. Анализ зарубежных литературных источников показывает, что эффективные дозы пациентов при данной технологии могут достигать 20 – 30 мЗв за исследование.

Представленные особенности ПЭТ-диагностики свидетельствуют о необходимости и высокой актуальности оценки структуры ПЭТ-диагностики в Российской Федерации, которая включает информацию об аппаратном парке, видах ПЭТ-исследований, применяемых РФП, параметрах проведения исследований и дозах пациентов в медицинских организациях (МО) страны.

Для определения доз пациентов необходим анализ существующих методов их оценки и адаптация к современным особенностям диагностических ПЭТ/КТ-исследований. На основании собранных данных необходимо провести анализ и

¹ Доза пациента – доза излучения, полученная пациентом при проведении рентгенорадиологического исследования

оценку состояния радиационной защиты пациентов в отечественной ПЭТ-диагностике с последующей разработкой методик оптимизации, гармонизации и стандартизации протоколов проведения ПЭТ-исследований.

Степень научной разработанности проблемы. Принцип оптимизации защиты пациентов от медицинского облучения заключается в сохранении разумного баланса между снижением доз у пациентов и необходимым качеством получаемой диагностической информации. В зарубежных странах для этого разработаны и применяются на практике единые требования проведения медицинских исследований как с точки зрения объективных диагностических показателей, так и с точки зрения дозиметрических параметров. Для обеспечения надлежащего качества ПЭТ-исследования разработаны единые рекомендации, согласно которым проводится периодическая калибровка диагностического оборудования, и действует программа сертификации диагностических отделений, нацеленная на контроль качества работы оборудования и соответствия применяемых методик существующим стандартам. Для оптимизации радиационной защиты пациентов в диагностике используют референтные диагностические уровни (РДУ), которые являются критерием для сравнения доз пациентов в данном исследовании с общепринятой практикой и используются для выявления аномально высоких доз. До начала данной работы в отечественной системе санитарно-гигиенического нормирования не учитывались особенности проведения диагностических исследований методом ПЭТ, отсутствовала система оптимизации и обеспечения качества ПЭТ/КТ-исследований, а существующая методика оценки эффективных доз пациентов при КТ-сканировании, основанная на использовании коэффициентов перехода от значения дозового параметра DLP (произведение дозы на длину сканирования) к эффективной дозе, не позволяла оценить их при сканировании всего тела, которое наиболее часто проводится при ПЭТ/КТ-исследованиях. Это явилось основанием для выполнения данного исследования.

Цель исследования. Разработка системы оптимизации радиационной защиты пациентов при проведении ПЭТ/КТ-исследований на основании исследования закономерностей формирования доз у пациентов и качества получаемой диагностической информации.

Задачи исследования.

1. Сбор и анализ параметров проведения ПЭТ/КТ-исследований, оценка структуры ПЭТ-диагностики и оценка эффективных доз внешнего и внутреннего облучения пациентов.
2. Экспериментальная проверка и определение новых коэффициентов перехода для оценки эффективной дозы у пациента при КТ-сканировании.
3. Разработка системы обеспечения качества в ПЭТ, включающей контроль количественных параметров ПЭТ-изображения и единые критерии, нацеленные на гармонизацию и оптимизацию ПЭТ-диагностики.

4. Разработка системы снижения доз пациентов при ПЭТ/КТ-исследованиях путем применения референтных диагностических уровней.
5. Определение путей оптимизации протоколов КТ-сканирования за счет снижения доз пациентов при поддержании диагностического качества изображения.

Научная новизна.

- Впервые определена структура ПЭТ/КТ-диагностики и оценены средние эффективные дозы пациентов на основании результатов обследования более 60% ПЭТ-отделений страны.
- Впервые определены органные дозы при КТ-сканировании с помощью ТЛД-измерений в специализированных дозиметрических фантомах разных возрастных групп и проведена верификация расчётных программ в условиях сканирования всего тела. На основании измерений определены новые коэффициенты перехода для оценки доз при КТ.
- Получены зависимости коэффициента восстановления как параметра качества ПЭТ-изображения от размера очага и уровня накопления активности по результатам экспериментальной работы с фантомом MADEIRA.
- Научно обосновано использование РДУ в целях оптимизации радиационной защиты пациентов в ПЭТ/КТ-диагностике. Доказана нецелесообразность применения РДУ для внутреннего облучения пациентов. Впервые предложены значения РДУ для КТ-исследований всего тела и головы как части ПЭТ/КТ-исследований и выявлены аппараты с аномально высокими дозами.
- Получены зависимости дозы пациента и качества КТ-изображения от основных параметров протоколов КТ-сканирования. Определены оптимальные значения параметров для программ автоматической модуляции силы тока трёх основных производителей ПЭТ/КТ-аппаратов.

Практическая и теоретическая значимость работы. В работе научно обоснована и предложена к внедрению в отечественную практику система оптимизации защиты пациентов при проведении диагностических ПЭТ/КТ исследований, включающая оценку качества ПЭТ-изображения, применение референтных диагностических уровней для снижения доз пациентов и использование оптимальных параметров протоколов КТ-сканирования; определены новые коэффициенты перехода для оценки эффективных доз пациентов при КТ-сканировании с учетом протоколов, используемых в ПЭТ-диагностике.

С участием автора разработаны следующие нормативно-методические документы:

- Методические указания МУ 2.6.1.3151-13 «Оценка и учет эффективных доз у пациента при проведении радионуклидных диагностических исследований». Москва, Роспотребнадзор, 2013 г. Утверждены 20.12.2013 г.
- Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.3288-15 «Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при подготовке и проведении позитронной эмиссионной томографии». Москва, Роспотребнадзор, 2015 г. Утверждены 20.07.2015 г.
- Методические рекомендации МР 2.6.1.0098-15 «Оценка радиационного риска у пациентов при проведении рентгенорадиологических исследований». Роспотребнадзор, 2015 г. Утверждены 06.04.2015 г.
- Методические указания МУ 2.6.1.3387-16 «Радиационная защита детей в лучевой диагностике». Москва, Роспотребнадзор, 2016 г. Утверждены 26.07.2016 г.

Теоретическая значимость работы обусловлена важностью научного подхода к оптимизации защиты пациента, включающего в себя определение зависимостей параметров качества ПЭТ- и КТ-изображения и эффективной дозы у пациентов от разных факторов.

Положения, сформулированные в диссертационной работе, включены учебный процесс ФБУН «Санкт-Петербургский НИИ радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» по программе дополнительного профессионального образования на цикле повышения квалификации «Радиационная безопасность пациентов и персонала при рентгенорадиологических исследованиях», проводимом для специалистов испытательных лабораторий, персонала отделений лучевой диагностики и врачей по радиационной гигиене.

Методы исследования.

- Сбор данных о параметрах проведения ПЭТ/КТ-исследований путем прямой регистрации данных и анкетирования медицинского персонала.
- Вычисление эффективных доз внешнего и внутреннего облучения пациентов при ПЭТ/КТ-исследованиях на основе параметров проведения исследования.
- Верификация расчетных методов оценки доз внешнего облучения при КТ-сканировании путем измерений с использованием антропоморфных фантомов и термолюминесцентных детекторов.
- Анализ влияния параметров проведения ПЭТ/КТ-исследований на дозу пациента и качество изображения.
- Статистический анализ полученных данных.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Наиболее распространенным и высокодозовым видом ПЭТ-исследования в России является исследование всего тела с введением пациенту ^{18}F -ФДГ,

- эффективные дозы пациентов, в среднем, 17 мЗв еще увеличиваются при проведении многофазного КТ-сканирования. Наибольший вклад в дозу пациентов при ПЭТ/КТ исследованиях (65 – 90 %) вносит КТ-сканирование.
- Значения новых коэффициентов перехода для оценки эффективных доз у пациентов при КТ-сканировании для основных протоколов, используемых в ПЭТ-диагностике: голова – 0,0014 мЗв/(мГр·см), грудная клетка – 0,012 мЗв/(мГр·см), брюшная полость – 0,014 мЗв/(мГр·см), малый таз – 0,015 мЗв/(мГр·см), все тело – 0,015 мЗв/(мГр·см).
 - Методика контроля количественных параметров ПЭТ-изображения (коэффициентов восстановления) и единые критерии, нацеленные на гармонизацию и оптимизацию ПЭТ-диагностики;
 - Методические основы для проведения оптимизации защиты пациента при ПЭТ/КТ-исследованиях посредством использования РДУ для КТ-сканирования;
 - Оптимизация протоколов КТ-сканирования основана на изучении зависимостей дозы пациента и качества изображения от основных параметров проведения исследования. Зависимости дозы пациента и шума КТ-изображения от основных параметров (напряжения на трубке и mAs) имеют одинаковый характер для аппаратов разных моделей и не зависят от производителя, а программы автоматической модуляции силы тока являются вендор-специфичными и требуют индивидуального изучения.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты исследований основаны на данных, собранных в 19 медицинских организациях Российской Федерации, что составляет более 60% ПЭТ-отделений страны.

Результаты исследования, а также основные положения работы доложены и обсуждены на:

- Международной научно-практической конференции ХLI – Неделя науки СПбГПУ (Санкт-Петербург, Россия, 2012);
- международных научно-практических конференциях «Актуальные вопросы радиационной гигиены» (Санкт-Петербург, Россия, 2014; 2016);
- Международном Невском Радиологическом форуме НРФ-2013; НРФ-2015; НРФ-2017, НРФ-2018 (Санкт-Петербург, Россия, 2013, 2015, 2017, 2018);
- 11-й; 12-й; 13-й международных конференциях «Medical physics in the Baltic states» (Каунас, Литва, 2013, 2015, 2017);
- III всероссийской научно-практической конференции производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, Россия, 2016);
- конференции «Optimisation in X-ray and Molecular Imaging 2015» (Гётеборг, Швеция, 2015);

- 30-м международном конгрессе европейской ассоциации ядерной медицины EANM 2017 (Вена, Австрия, 2017);
- конференциях «Radiation protection in medicine» (Варна, Болгария, 2014; Вена, Австрия, 2017);
- I Всероссийском научно-образовательном конгрессе с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (Москва, Россия, 2018);
- конгрессе «European Congress of Radiology» (Вена, Австрия, 2018).

Апробация диссертации проведена на расширенном межлабораторном совещании ФБУН НИИРГ им. П. В. Рамзаева «28» июня 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 научных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, 6 научных статей в журналах, входящих в международные реферативные базы данных (Scopus, PubMed), 1 санитарные правила и нормы, 2 методических указаний, 1 методические рекомендации.

Структура и объем работы диссертации. Работа состоит из введения, литературного обзора, четырех глав собственных исследований, заключения, выводов, списка литературы, включающего 31 отечественный и 108 иностранных источников, 2 приложений. Диссертация изложена на 154 страницах машинописного текста, иллюстрирована 35 таблицами, 36 рисунками.

ОБЪЕКТЫ, ОБЪЕМ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись диагностические исследования, проводимые методом ПЭТ, и сопутствующие им дозы пациентов. Обследовали 19 отделений ПЭТ-диагностики в двенадцати регионах Российской Федерации: Санкт-Петербург, Москва, Казанская область, Белгородская область, Приморский край, Башкортостан, Тюменская область, Тамбовская область, Курская область, Липецкая область, Орловская область, Свердловская область. Сбор данных проводили в 2012 – 2017 годах.

Сбор данных для определения стандартных доз пациентов в разных отделениях страны проводили путем опроса персонала с использованием типовых анкет. Фиксировали информацию о персонале, оборудовании, видах исследований, протоколах ПЭТ- и КТ-сканирования. Дозы пациентов при проведении ПЭТ/КТ-исследования определяли, как сумму доз внутреннего и внешнего облучений. Дозу внутреннего облучения определяли по вводимой пациенту активности радионуклида в определенном РФП, дозу внешнего облучения – на основании значения DLP (произведение дозы на длину). Для определения стандартных доз пациентов собирали информацию о вводимой активности радионуклидов в РФП для стандартного пациента (масса тела 70 ± 3 кг) и значений DLP при КТ-сканировании для выборки 30 – 50 взрослых пациентов без учета их веса.

Для оценки органных и эффективной доз и определения новых коэффициентов перехода от DLP к эффективной дозе при КТ-сканировании экспериментальную работу по измерению органных доз проводили на томографах Definition Flash, Siemens и Ingenuity Core, Philips. Экспериментальную работу для контроля качества ПЭТ-исследований проводили на четырех томографах разных моделей: Biograph 16, Siemens; Gemini, Philips; Gemini ToF, Philips и Discovery 710, General Electric. Экспериментальную работу для нахождения оптимальных параметров протоколов КТ-сканирования проводили на аппаратах КТ, которые являются частью ПЭТ/КТ: Optima, General Electric; Ingenuity Core, Philips; Definition, Siemens.

Предметом исследования являлись параметры проведения ПЭТ/КТ-исследований и стандартные дозы пациентов в России. В качестве единой расчетной величины для сопоставления доз внутреннего и внешнего облучения пациентов использовали эффективную дозу. Эффективные дозы от внутреннего облучения пациентов определяли с использованием дозовых коэффициентов для разных РФП. Для определения эффективных доз от внешнего облучения пациентов был проведен анализ разных методов оценки доз от КТ-сканирования. Для этого провели сравнение эффективных доз, определенных с помощью расчетных программ CT-Expo, VirtualDoseCT, NCIST, и измеренных с использованием ТЛ-детекторов в антропоморфных фантомах трех возрастных групп пациентов (1 год, 5 лет и взрослый). По результатам сравнения были определены новые коэффициенты перехода для оценки эффективных доз от КТ-сканирования, которые использовали в работе.

Для сравнения методов контроля качества ПЭТ-изображения провели несколько серий экспериментов на четырех разных томографах с фантомами MAIDERA и NEMA NU-2 2001, которые позволяют имитировать очаги накопления РФП и оценить влияние их размеров на количественную оценку активности на ПЭТ-изображении. При оценке ПЭТ-изображений в качестве количественного параметра использовали коэффициенты восстановления (КВ). КВ оценивали, как отношение объёмной активности в очаге фантома, измеренной на полученном ПЭТ-изображении, и фактической объёмной активности, введённой при подготовке фантома.

Экспериментальные работы по определению зависимости дозы пациента и качества изображения от параметров протоколов КТ-сканирования выполняли с использованием антропоморфного фантома грудной клетки Multipurpose Chest Phantom N1 “Lungman”, который отображает нормальную анатомию грудной клетки взрослого пациента. В качестве параметра качества использовали шум КТ-изображения.

Личный вклад автора в организацию и проведение исследований – 95%, в анализ и обобщение результатов – 95%.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Определение новых коэффициентов перехода для оценки эффективной дозы от КТ-сканирования в ПЭТ/КТ-диагностике. В связи с особенностью протоколов КТ-сканирования, используемых при ПЭТ/КТ-исследованиях, и необходимостью оценки новых дозовых коэффициентов перехода для определения эффективных от КТ-сканирования в работе провели: анализ существующих расчетных программ для определения эффективных доз; их верификацию с помощью измерений; оценку новых коэффициентов перехода, связывающих регистрируемое за исследование значение DLP и значение эффективной дозы с учетом особенностей протоколов, используемых в ПЭТ-диагностике.

На основании органных доз, рассчитанных с помощью программ CT-Expo, VirtualDoseCT и NCIST и измеренных с помощью ТЛД, были определены эффективные дозы; различия между значениями, полученными разными методами, не превышали 10%. Из трех протестированных программ VirtualDoseCT является предпочтительной из-за большей сходимости результатов с измерениями и использования в ней современных гибридных фантомов.

На основании эффективных доз, рассчитанных с помощью указанных программ и измерений, определили коэффициенты перехода для сканирования всего тела пациентов разных возрастных групп, которые отсутствуют в действующей методике. Для областей сканирования: голова, грудная клетка, брюшная полость, малый таз коэффициенты перехода были определены на основании расчетных программ. Сравнение полученных значений продемонстрировало, что в МУ 2.6.1.2944-11 значения коэффициентов завышены для большинства видов исследований на 40 – 70 %. Для оценки доз стандартного пациента в данной работе использовали новые дозовые коэффициенты, определенные с использованием программы VirtualDoseCT (Таблица 1); они включены в проект изменений МУ 2.6.1.2944-11.

Таблица 1. Существующие и модифицированные коэффициенты перехода от значения DLP к эффективной дозе для выбранных областей КТ-сканирования для взрослых пациентов.

Зона КТ-сканирования	k, мЗв/(мГр·см)	
	Существующие (МУ 2.6.1.2944-11)	Модифицированные (данная работа)
Голова	0,0023	0,0014
Грудная клетка	0,017	0,012
Брюшная полость	0,015	0,014
Малый таз	0,019	0,015
Все тело	-	0,015

Определение стандартных доз пациентов в отделениях ПЭТ-диагностики в Российской Федерации. Перечень основных ПЭТ-исследований, выполняемых в России, приведен в таблице 2.

Таблица 2. ПЭТ-исследования, проводимые в Российской Федерации, используемые РФП, вводимые активности, МБк, и стандартные эффективные дозы внутреннего облучения пациентов, мЗв.

Вид ПЭТ исследования, РФП	Число ПЭТ отделений	Стандартные активности, среднее и диапазон, МБк	Стандартные эффективные дозы, среднее и диапазон, мЗв
Головной мозг с ^{18}F -ФДГ	5	170 (120-200)	3 (2-4)
Головной мозг с ^{18}F -тирозин	2	200 (200-200)	3 (3-3)
Головной мозг с ^{18}F -холин	2	190 (175-225)	4 (4-5)
Головной мозг с ^{11}C -метионин	4	280 (250-450)	2 (2-4)
Все тело с ^{18}F -ФДГ	19	280 (200-390)	5 (4-7)
Все тело или таз с ^{18}F -холин	3	310 (225-350)	6 (5-7)
Все тело или таз с ^{11}C -холин	2	380 (210-550)	2 (1-2)
Перфузия миокарда с ^{13}N -аммоний	2	775 (750-800)	2 (2-2)
Все тело с ^{68}Ga - PSMA	1	105	2
Все тело с ^{68}Ga - DOTA-TATE/ ^{68}Ga - DOTA-NOC	1	105	2

Наиболее распространенным видом ПЭТ-исследования в России является исследование всего тела с введением пациенту ^{18}F -ФДГ. Форма распределения отделений ПЭТ по стандартным активностям ^{18}F -ФДГ и дозам внутреннего облучения отлична от нормального, у распределения есть два максимума (бимодальное распределение) при вводимых активностях 240 МБк и 340 МБк, что соответствует дозам 4 мЗв и 6 мЗв. Наличие двух выделенных пиков демонстрирует наличие двух различных методик проведения исследований, используемых в практике разных отделений ПЭТ-диагностики в России. Применение разных методик проведения ПЭТ-исследований и неоднородность аппаратного парка могут приводить к несопоставимым результатам исследований, проводимых в разных отделениях страны. Для гармонизации метода необходима единая система обеспечения качества, нацеленная на контроль количественных параметров ПЭТ-изображения, и критерии для их сравнения. Такое решение позволит пациентам проходить повторные исследования в любом отделении страны.

В таблице 3 представлены данные о видах КТ-сканирования, проводимых при ПЭТ/КТ-исследованиях, стандартные DLP и эффективные дозы внешнего облучения пациентов.

Таблица 3. Зоны КТ-сканирования, стандартные DLP, мГр·см, и эффективные дозы внешнего облучения пациентов, мЗв, в обследованных отделениях ПЭТ/КТ-диагностики.

Зона КТ сканирования	Число ПЭТ аппаратов	Стандартные DLP, среднее и диапазон, мГр·см	Стандартные дозы, среднее и диапазон, мЗв
Все тело	22	800 (400-1700)	12 (6-26)
Все тело + ГК ¹⁾	4	1000 (830-1100)	15 (12-17)
Все тело с контрастом	10	1500 (1300-2400)	23 (20-36)
Голова	18	440 (40-1700)	1 (0,1-2)
Грудная клетка (зона сердца)	3	70 (50-100)	1 (1-1)
Малый таз	2	500	8 (8-8)

¹⁾ ГК – грудная клетка

Чаще всего в ПЭТ/КТ-диагностике применяют протокол сканирования всего тела, которое выполняют при среднем значении стандартных DLP 800 мГр·см, что формирует среднюю дозу пациента 12 мЗв. Распределение аппаратов по дозе при обычном КТ-сканировании всего тела имеет бимодальный характер. Это свидетельствует о наличии двух методик, в соответствии с которыми проводятся КТ-исследования. Соответственно, предполагается использование низкодозового протокола с дозой 8 мЗв (DLP 500 мГр·см) и диагностического протокола со средней дозой 14 мЗв (DLP 900 мГр·см-). Однако, есть аппараты, на которых соответствующие исследования проводятся с меньшей или большей дозой. В некоторых отделениях протокол КТ-сканирования всего тела дополняют КТ-сканированием грудной клетки на задержке дыхания. Также применяют многофазный протокол, подразумевающий введение контрастного вещества, в таком случае доза пациента возрастает, в среднем, в 2 раза за счёт дополнительных фаз сканирования (Табл.3). Частое использование диагностического протокола КТ-сканирования при ПЭТ/КТ-исследованиях в России обусловлено низкой обеспеченностью высокотехнологичным диагностическим оборудованием регионов страны и отсутствием у пациентов предварительных результатов КТ или МРТ.

Эффективные дозы от ПЭТ/КТ-исследований оценивали, как сумму доз внутреннего облучения от введенного РФП и внешнего облучения от КТ-сканирования. Структура эффективных доз от разных ПЭТ/КТ-исследований представлена на рисунке 1.

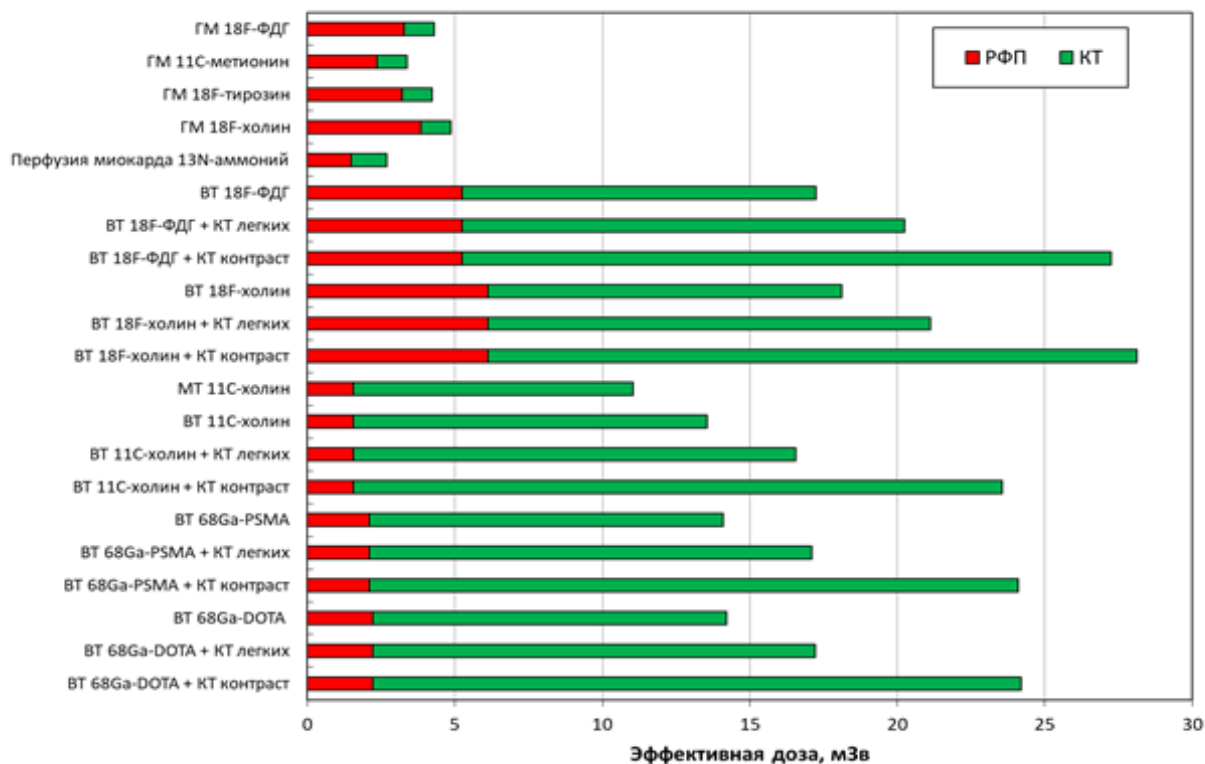


Рисунок 1. Средние значения эффективной дозы, мЗв, внутреннего (РФП) и внешнего (КТ) облучения пациентов в результате ПЭТ/КТ-исследований головного мозга (ГМ), малого таза (МТ), всего тела (BT), миокарда.

Средние дозы внутреннего облучения находятся в пределах 1 – 7 мЗв для всех видов диагностики. Доза внешнего облучения в разных исследованиях варьирует от 0,1 до 36 мЗв в зависимости от зоны сканирования и задачи исследования. Эффективная доза при ПЭТ/КТ-исследовании головного мозга и миокарда, в среднем, составляет 3 – 5 мЗв, при этом вклад от КТ-сканирования составляет 20% – 50%; в случае проведения дополнительной КТ-ангиографии коронарных артерий доза пациента возрастает до 35 – 40 мЗв. При исследовании всего тела пациенты получают дозы, в среднем, около 17 мЗв. При диагностическом многофазном КТ-сканировании с контрастным усилением доза увеличивается до 25 – 30 мЗв, при этом вклад КТ в суммарную дозу пациента составляет 65 – 90%.

Сравнение с дозами пациентов от аналогичных исследований в других странах продемонстрировало, что в России дозы пациентов от проведения ПЭТ/КТ-исследований выше, чем во многих странах с развитой медициной. Превышение обусловлено дозой от КТ-сканирования, что подчеркивает необходимость оптимизации радиационной защиты пациента путем снижения дозы от КТ.

Оптимизация протоколов проведения ПЭТ-исследований. Объем и качество диагностической информации, полученной с помощью метода ПЭТ, зависит от множества факторов, включая методику проведения исследования и настройку

оборудования. Использование различных протоколов сканирования и обработки данных может приводить к разным результатам оценки уровня накопления РФП в очагах одного пациента на изображении в разных ПЭТ-отделениях, что вынуждает пациентов привязываться к определенному месту для проведения повторных исследований. Для сравнения протоколов ПЭТ-исследований и определения критериев их оценки необходим анализ и контроль количественных результатов ПЭТ-сканирования.

Важным количественным параметром ПЭТ-изображения является КВ, который специфичен для каждого протокола сбора и обработки данных аппарата и изменяется с размером очага. Для изучения влияния разных факторов на КВ провели серию экспериментов на четырех моделях томографов, представляющих аппаратный парк страны, с фантомами NEMA NU-2 2001 и MADEIRA, которые позволяют имитировать очаги разных размеров. Наибольшая точность определения активности на ПЭТ-изображении с фантомом MADEIRA достигается при диаметрах областей интереса не менее 13 мм; при уменьшении диаметра КВ уменьшается, а при диаметрах областей интереса 10 мм недооценка активности достигает 20 – 40% и растет с уменьшением размера. Зависимости КВ от размера очага, полученные для четырех исследованных моделей томографов с использованием обоих фантомов, имели одинаковый характер.

Результаты работы с фантомом MADEIRA продемонстрировали, что значения КВ не являются универсальными для всех уровней накопленной активности в очагах, а зависят не только от размера, но и от отношения накопленной активности в очаге к фоновой (L/B).

Фантом MADEIRA обладает рядом преимуществ, которые были выявлены во время работы: возможность оценки воспроизводимости активности в малых объектах размерами менее 10 мм; возможность одновременного исследования областей интереса разного диаметра с разной объёмной активностью. В результате проведенных экспериментов с фантомом MADEIRA была предложена система обеспечения качества, включающая определение и применение КВ как сравнительного параметра ПЭТ-изображения.

Система подразумевает регулярное выполнение следующих процедур:

- процедуры проверки параметров аппарата ПЭТ/КТ должны проводиться согласно руководству пользователя;
- проверка однородности изображения согласно рекомендациям производителя (не реже, чем раз в неделю);
- проверка синхронизации времени в процедурной введении РФП (дозкалибратора) и на станции сбора данных томографа (ежедневно);
- кросс-калибровка дозкалибратора и томографа (не реже, чем раз в квартал, при замене основных частей аппарата, изменении настроек дозкалибратора);

- контроль качества изображения с использованием специализированного фантома MADEIRA и определение КВ на основании проделанных измерений (не реже, чем раз в полгода, при замене основных частей аппарата, изменении настроек дозкалибратора, создании нового протокола проведения исследования).

Процедура контроля качества изображения является заключительным этапом и должна выполняться на откалиброванном оборудовании. В работе приведены критерии оценки КВ, которые могут быть использованы для оценки протоколов (Табл. 4).

Таблица 4. Средние (KB_{cp}) и максимальные (KB_{max}) значения коэффициентов восстановления (КВ) при процедурах контроля качества ПЭТ-изображения с использованием фантома MADEIRA.

Размер очага, мм	L/B = 2,5		L/B = 5		L/B = 10		L/B = 20		L/B = 35	
	KB_{cp}	KB_{max}	KB_{cp}	KB_{max}	KB_{cp}	KB_{max}	KB_{cp}	KB_{max}	KB_{cp}	KB_{max}
5	-	-	0,31	0,40	0,17	0,20	0,20	0,25	0,20	0,30
6	-	-	0,40	0,50	0,25	0,33	0,28	0,35	0,24	0,38
8	0,44	0,57	0,53	0,63	0,46	0,54	0,42	0,53	0,34	0,46
10	0,55	0,69	0,65	0,81	0,58	0,79	0,56	0,67	0,41	0,55
12	0,70	0,87	0,77	0,94	0,73	0,91	0,61	0,78	0,49	0,61
14	0,80	0,98	0,87	1,06	0,79	0,98	0,71	0,88	0,58	0,72
16	0,89	1,10	0,91	1,16	0,86	1,06	0,79	0,96	0,62	0,76

В случае, если КВ выше или ниже 10% приведенного интервала, необходимо выявить и устранить причину несоответствия. Наиболее распространенными причинами являются: неоткалиброванный аппарат, нестандартные алгоритмы реконструкции или процедурные ошибки.

Предложенная система обеспечения качества позволяет следить за изменением состояния оборудования, сравнивать различные протоколы проведения исследования по количественному параметру ПЭТ-изображения и решить вопрос стандартизации протоколов ПЭТ-исследований в разных отделениях страны. Повсеместное использование данной системы позволит повысить доступность и эффективность данного метода в стране за счет гармонизации протоколов, что даст возможность пациентам обследоваться в разных отделениях и не привязываться к одному аппарату.

Оптимизация протоколов проведения КТ-исследований. При реализации принципа оптимизации используется концепция референтных диагностических уровней (РДУ). Целью использования РДУ является поддержание доз пациентов на таких разумно достижимых низких уровнях, которые позволяют обеспечить получение необходимой диагностической информации. РДУ служит средством для проверки, не является ли уровень облучения пациента в данном отделении

существенно бóльшим, чем верхняя граница общепринятого диапазона, достаточного для получения диагностической информации. Общепринятым подходом при разработке РДУ является использование 75%-го перцентиля распределения аппаратов по дозе в регионе или стране в качестве референтного уровня для каждого вида исследований. В качестве дозовой величины для установления РДУ для КТ-исследований в зарубежной практике используют значение DLP; в отечественной практике основной дозовой величиной в радиационной защите является эффективная доза. В данной работе РДУ были установлены в двух дозовых величинах: DLP и эффективной дозе. Это позволит медицинскому персоналу отделений идентифицировать систематические превышения РДУ и оперативно принять меры по устранению причин высоких доз. Установление РДУ и оптимизация защиты пациента в КТ целесообразно проводить по следующей схеме:

- определение стандартных доз для каждого выбранного вида КТ-сканирования в выбранной дозовой величине;
- построение распределений КТ-аппаратов по значениям стандартных доз для данного вида исследований;
- определение значения РДУ как 75%-го перцентиля распределения КТ-аппаратов по стандартным дозам.

В работе были предложены значения РДУ для КТ-сканирований всего тела и головы (Табл. 5), остальные исследования проводят намного реже. В связи с наличием в России двух разных методик проведения сканирования всего тела (низкодозовый протокол и диагностический, включая многофазные исследования) значения РДУ предложены для обоих протоколов.

Таблица 5. Предлагаемые значения референтных диагностических уровней для КТ-сканирований всего тела и головы в Российской Федерации.

Дозовая величина	Область КТ-сканирования		
	Голова	Все тело (низкодозовый протокол)	Все тело (диагностический протокол)
DLP, мГр·см	1200	600	1000
Эффективная доза, мЗв	2	9	15

Для многофазных КТ-исследований всего тела целесообразно использовать значение РДУ, соответствующее диагностическому протоколу для каждой фазы. В протоколах для сканирования всего тела, предполагающих дополнительное сканирование грудной клетки на вдохе, в качестве РДУ для всего тела необходимо использовать значение для соответствующего протокола. В таком случае стандартная доза определяется отдельно для каждого сканирования/фазы и сравнивается с соответствующим значением РДУ. После выявления anomalно

высоких доз при сравнении с РДУ необходимо провести расследование причин и оптимизацию протоколов сканирования. Выбор оптимального протокола КТ-сканирования должен основываться на практике работы в отделении, возможностях конкретного аппарата и поставленной клинической задаче.

С точки зрения радиационной защиты пациентов оптимальным является протокол, обеспечивающий приемлемый с диагностической точки зрения низкий уровень шума КТ-изображения при наименьшей эффективной дозе у пациента. Для выбора такого протокола проанализировали зависимости шума изображения и эффективной дозы от параметра мАс (произведение силы тока на время ротации трубки). Для трех обследованных аппаратов были определены одинаковые зависимости: шум изображения резко снижается (обратно пропорционально корню квадратному из значения мАс) с увеличением мАс; однако после определенного значения мАс снижение замедляется в то время, как эффективная доза линейно возрастает во всем диапазоне мАс (Рис.2). Таким образом, дальнейшее увеличение параметра мАс не приводит к значимому снижению шума и улучшению качества изображения, но может привести к избыточному облучению пациента. Поэтому точкой оптимума выбрали значение параметра мАс, при котором уровень шума перестаёт существенно изменяться (Табл. 6).

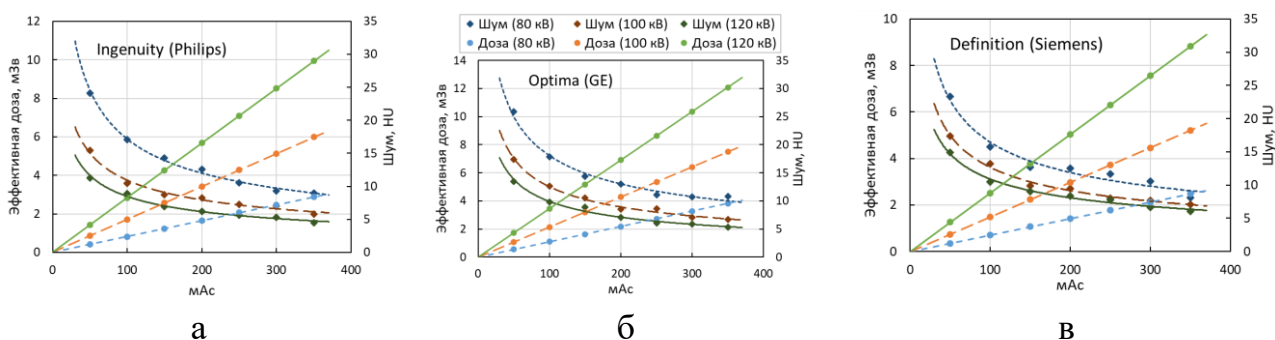


Рисунок 2. Зависимости значений эффективной дозы, мЗв, и шума КТ-изображения, НУ, от произведения силы тока и времени ротации трубки, мАс, полученные для разных значений напряжения на разных моделях КТ: а – Ingenuity (Philips), б – Optima (GE), в – Definition (Siemens). Линиями на графиках отмечены аппроксимирующие зависимости.

Для выбора оптимальных параметров проведения КТ-сканирования диагностическое оборудование оснащено системами автоматической модуляции силы тока, которые позволяют получать КТ-изображение определенного качества за счет автоматического подбора параметров сканирования под индивидуальные антропометрические особенности пациента. Такие системы специфичны для каждого производителя оборудования и отличаются по принципу формирования дозы при сканировании и параметрам, задаваемым в протоколе. В работе были изучены зависимости дозы пациентов и шума КТ-изображения от параметров систем Auto mA (GE), CareDose (Siemens), DoseRight (Philips) для определения

оптимальных значений, которые можно использовать при создании протоколов. При рассмотрении систем автоматической модуляции силы тока аналогично оптимальным значениям параметра mAs нашли оптимальные значения параметров автоматической модуляции силы тока (Табл. 6).

Таблица 6. Оптимальные параметры для томографов трёх разных производителей для обоих случаев: без использования автоматической модуляции силы тока и с включёнными системами автоматической модуляции силы тока.

Напряжение, кВ	$i \cdot t$, мАс	Эфф. доза, мЗв	Шум КТ-изображения, НУ	Параметр автоматической модуляции силы тока	Эфф. доза, мЗв	Шум КТ-изображения, НУ
GE				Auto mA (NI)		
80	360	4,0	10	17	2,7	13
100	170	3,8	9	17	2,6	13
120	110	3,8	9	18	2,5	12
Siemens				CareDose (ref.mAs)		
80	360	2,6	9	320	2,9	10
100	180	2,8	10	160	2,8	10
120	120	3,0	10	100	2,6	9
Philips				DoseRight (DRI)		
80	360	3,0	9	8	1,0	15
100	170	3,0	9	7	0,9	14
120	100	3,0	9	7	0,8	13

Полученные результаты демонстрируют, что оптимальные значения параметра mAs схожи для всех моделей томографов, представляющих разных производителей (360 mAs для напряжения 80 кВ, 170 – 180 mAs для 100 кВ, 100 – 120 mAs для 120 кВ). При этих параметрах на всех томографах достигается изображение одного уровня шума ≈ 10 НУ, однако при разной эффективной дозе. Системы автоматической модуляции силы тока являются вендор-специфичными; определенные оптимальные параметры с точки зрения соотношения эффективная доза – шум КТ-изображения можно использовать для пациентов разной комплекции на аппаратах разных производителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В данной работе был проведен сбор и анализ параметров проведения ПЭТ/КТ-исследований в России. На основании собранных данных оценены дозиметрические показатели, включая эффективную дозу пациента.

Проведен анализ методов оценки эффективных доз пациентов, проходящих КТ-сканирование в рамках ПЭТ-исследования. Наряду с методом, описанным в МУ 2.6.1.2944-11, рассмотрели специализированные расчетные программы СТ-Ехро, NCICT и VirtualDoseCT и провели прямые измерения доз методом ТЛД в органах

антропоморфных фантомов разных возрастных групп пациентов. Получены новые дозовые коэффициенты для КТ-сканирований, проводимых при ПЭТ/КТ-исследованиях.

Для гармонизации и стандартизации протоколов проведения ПЭТ-исследований была разработана система обеспечения качества в ПЭТ-диагностике, нацеленная на сравнение характеристик систем ПЭТ и протоколов сканирования посредством контроля качества ПЭТ-изображения. В работе изучены два фантома для оценки качества ПЭТ-изображения: MAIDERA и NEMA NU-2 2001, проведено сравнение результатов, полученных каждым из методов, и выбран наиболее целесообразный. В результате работы получены зависимости количественного параметра ПЭТ-изображения – коэффициента восстановления (КВ) – от размера изучаемого очага и накопленной в нём активности для четырех разных моделей аппаратов, представляющих основной аппаратный парк страны.

Для оптимизации радиационной защиты пациентов в работе была предложена система оптимизационных мероприятий, основанная на использовании РДУ. Предложены значения РДУ для основных видов КТ-сканирований, основанные на собранных данных, с учетом особенностей ПЭТ/КТ-исследований в стране – наличия двух протоколов при сканировании всего тела: низкодозового и диагностического (включая многофазные исследования). Изучены зависимости дозы пациента и качества КТ-изображения от параметров протокола сканирования, найдены оптимальные параметры для аппаратов разных моделей для дальнейшего устранения аномально высоких доз пациентов.

Из результатов исследований вытекают следующие научные выводы:

1. Наиболее распространенное ПЭТ/КТ-исследование проводят с ^{18}F -ФДГ, чаще проводят сканирование всего тела для диагностики онкологических заболеваний, остальные исследования проводят реже. Исследования всего тела создают эффективные дозы у взрослого пациента, в среднем, 17 мЗв (10 – 33 мЗв), а при исследовании сердца и головного мозга – 3 – 5 мЗв. При использовании многофазного протокола КТ с внутривенным контрастированием эффективная доза у пациента может достигать 40 мЗв. В среднем дозы пациентов при ПЭТ/КТ-исследованиях в России на 40% выше по сравнению с дозами в других странах. Основной вклад в дозу вносит КТ-сканирование, который достигает 65 – 90%. Этот факт и сравнение с практикой других стран указывает на возможность снижения доз пациентов за счет оптимизации протоколов КТ-сканирования.
2. Измерения доз в органах антропоморфных фантомов методом ТЛД подтвердили результаты расчётных программ CT-Expo, NCICT и VirtualDoseCT. Однако в повседневной практике медицинских организаций для оценки эффективной дозы от КТ-сканирования наиболее приемлем метод, основанный на использовании значения DLP с консоли томографа и соответствующего

коэффициента перехода (МУ 2.6.1.2944-11). В работе получены новые коэффициенты перехода для основных областей сканирования (голова – 0,0014 мЗв/(мГр·см), грудная клетка – 0,012 мЗв/(мГр·см), брюшная полость – 0,014 мЗв/(мГр·см), малый таз – 0,015 мЗв/(мГр·см), все тело – 0,015 мЗв/(мГр·см), которые учитывают протоколы, используемые в ПЭТ-диагностике.

3. Зависимость КВ от диаметра очага описывается логарифмической функцией для средних и максимальных значений, а зависимость КВ от L/V – полиномом второй степени с экстремумом функции при L/V = 6. В работе предложена система обеспечения качества ПЭТ-изображения, которая позволяет получить КВ для каждого ПЭТ-аппарата на основании измерений с использованием специального фантома MADEIRA. Полученные значения КВ следует использовать для оценки стабильности работы системы, применимости протокола сканирования, а также для корректировки индекса накопления активности в очагах, что будет способствовать повышению эффективности и стандартизации ПЭТ-диагностики в стране.
4. Для оптимизации радиационной защиты пациентов при проведении ПЭТ/КТ-исследований предложено использовать РДУ. Анализ стандартных активностей и доз внутреннего облучения пациентов показал, что в России используют две методики проведения ПЭТ-исследования, при этом разброс стандартных активностей и доз внутреннего облучения не превышает 2 раз, что указывает на нецелесообразность установления РДУ для доз внутреннего облучения. Перспективным путем снижения доз пациентов является применение РДУ для КТ-сканирования. В работе предложены значения РДУ для наиболее распространенных протоколов КТ-сканирования всего тела (низкодозовый (9 мЗв) и диагностический (15 мЗв) протоколы сканирования) и головы (2 мЗв) и выявлены аппараты с аномально высокими дозами.
5. Доза пациента от КТ-сканирования прямо пропорциональна силе тока и растёт с увеличением напряжения; шум КТ-изображения обратно пропорционален корню квадратному из параметра мАс для аппаратов разных производителей. Определили оптимальные значения параметра мАс для каждого напряжения (360 мАс для напряжения 80 кВ, 170 –180 мАс для 100 кВ, 100 – 120 мАс для 120 кВ), которые обеспечивают уровень шума КТ-изображения ≈ 10 НУ. Отдельно изучили программы автоматической модуляции силы тока для каждого из трёх основных производителей и получили оптимальные значения параметров, специфичные для каждой программы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. **Чипига Л.А.** Контроль качества изображения в позитронно-эмиссионной томографии с помощью фантома MADEIRA / **Л.А. Чипига**, И.А. Звонова, Г.В. Катаева, Н.А. Костеников // Медицинская физика. – 2014. – Т. 63, № 3. – с. 48-56.

2. Balonov M.I. Russian practical guidance on radiological support for justification of X-ray and nuclear medicine examinations / M.I. Balonov, V.Yu. Golikov, S.A. Kalnitsky, **L.A. Chipiga**, S.S. Sarycheva, I.G. Shatskiy, A.V. Vodovатов // Rad. Prot. Dosim. – 2015. – Vol. 165, №1-4. – P. 39-42.

3. Zvonova I. Nuclear Medicine Examinations of Children in Russia / I. Zvonova, **L. Chipiga**, M. Balonov, E. Ermolina // Rad. Prot. Dosim. – 2015. – Vol. 165, №1-4. – P. 216-219.

4. Балонов М.И. Современные уровни медицинского облучения в России / М.И. Балонов, В.Ю. Голиков, И.А. Звонова, С.А. Кальницкий, В.С. Репин, С.С. Сарычева, **Л.А. Чипига** // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 4. – с. 67-79.

5. Звонова И.А. Радионуклидная диагностика в Санкт-Петербурге: текущее состояние и проблемы развития / И.А. Звонова, **Л.А. Чипига**, М.И. Балонов, В.Ю. Сухов // Радиационная гигиена. – 2015. – Т. 8, № 4. – с. 32-41.

6. **Chipiga L.** Patient doses in computed tomography examinations in two regions of the Russian Federation / L. Chipiga, C. Bernhardsson // Rad. Prot. Dosim. – 2016. – Vol. 169, № 1-4. – P. 240-244.

7. **Chipiga L.** Investigation of partial volume effect in different PET/CT systems: a comparison of results using the MADEIRA phantom and the NEMA NU-2 2001 phantom / **L. Chipiga**, M. Sydoff, I. Zvonova, C. Bernhardsson // Rad. Prot. Dosim. – 2016. – Vol. 169, № 1-4. – P. 365-370.

8. **Чипига Л.А.** Оценка коэффициентов перехода от произведения дозы на длину сканирования к эффективной дозе для КТ всего тела путем фантомных экспериментов / Л.А. Чипига, В.Ю. Голиков, Е.Н. Шлеенкова, А.В. Поздняков // Медицинская физика. – 2016. – Т. 72, № 3. – с. 55-62.

9. Водоватов А.В. Анализ уровней облучения взрослых пациентов при проведении наиболее распространенных рентгенографических исследований в Российской Федерации в 2009-2014 гг. / А.В. Водоватов, В.Ю. Голиков, С.А. Кальницкий, И.Г. Шацкий, **Л.А. Чипига** // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 3. – с. 66-75.

10. **Чипига Л.А.** Сравнение расчетных методов определения эффективной и органических доз у пациентов при компьютерно-томографических исследованиях / Л. А. Чипига // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 1. – с. 56-64.

11. Vodovатов A.V. Proposals for the establishment of national diagnostic reference levels for radiography for adult patients based on regional dose surveys in Russian

Federation / A.V. Vodovatov, M.I. Balonov, V.Yu. Golikov, I.G. Shatsky, **L.A. Chipiga**, C. Bernhardsson // Rad. Prot. Dosim. – 2017. – Vol. 173, №1-3. – P. 223-232.

12. **Чипига Л. А.** Уровни облучения пациентов и возможные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России / Л. А. Чипига, И. А. Звонова, Д. В. Рыжкова, М. А. Меньков, М. Б. Долгушин // Радиационная гигиена. – 2017. – Т. 10, № 4. – С. 31-43.

13. Balonov M. Patient doses from medical examinations in Russia: 2009–2015 / M. Balonov, V. Golikov, I. Zvonova, **L. Chipiga**, S. Kalnitsky, S. Sarycheva, A. Vodovatov // J. Radiol. Prot. – 2018. – Vol. 38, №1. – P. 121-139.

Работы, опубликованные в сборниках тезисов конференций:

1. **Чипига Л.А.** Сравнение трех методов коррекции аттенюации в ПЭТ / Л.А. Чипига, Г.В. Катаева // Международная научно-практическая конференция XLI – Неделя науки СПбГПУ: Сб. тезисов конференции. – СПб, 2012.- 198-199.

2. **Chipiga L.** PET image quality assurance with MADEIRA phantom / L. Chipiga, I. Zvonova // Proceedings of 11th International Conference «Medical physics in Baltic states» (Kaunas, 10-12 October 2013). – 2013. – P. 111 – 114.

3. Звонова И.А. Радионуклидные диагностические исследования детей / И.А. Звонова, М.И. Балонов, **Л.А. Чипига** // Международный VI Невский радиологический форум-2014: 352-353.

4. **Чипига Л.А.** Уровни облучения пациентов при компьютерных томографических исследованиях / Л.А. Чипига // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Сб. тезисов конференции. – СПб, 2014.- С.230-232.

5. **Chipiga L.A.** The first step to defining DRLs for CT-examinations in Russia. Program and abstracts. “Optimisation in X-ray and Molecular Imaging 2015. Fourth Malmö Conference on Medical Imaging”. Gothenburg, Sweden, 28-30 May, 2015, P-9.

6. **Chipiga L.A.**, M. Sydoff, I. Zvonova, C. Bernhardsson. Evaluation of image quality parameters in PET/CT using the MADEIRA and NEMA NU-2 2001 phantoms. Program and abstracts. “Optimisation in X-ray and Molecular Imaging 2015. Fourth Malmö Conference on Medical Imaging”. Gothenburg, Sweden, 28-30 May, 2015, P-34.

7. **Чипига Л.А.** Сравнение доз пациентов при КТ исследованиях в г. Белгород и г. Санкт-Петербург / Л.А. Чипига // Сб. научных работ «Невский радиологический форум – 2015» /под ред. В.Е. Савелло. – СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2015, с. 771-772.

8. **Чипига Л.А.** Дозы пациентов и пути оптимизации ПЭТ/КТ исследований / Л.А. Чипига // Современные проблемы эпидемиологии и гигиены: материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора.- СПб.: ФБУН НИИЭМ имени Пастера, 2015.-С.75-76.

9. Звонова И.А. Требования радиационной безопасности в ПЭТ диагностике / И.А. Звонова, М.И. Балонов, **Л.А. Чипига** // Сб. научных работ «Невский радиологический форум – 2015» /под ред. В.Е. Савелло. – СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2015, с. 152-153.

10. **Chipiga L.** Comparison between measured and calculated equivalent doses in CT using anthropomorphic pediatric phantoms / L. Chipiga, C. Bernhardsson // Proceedings of 12th International Conference «Medical physics in Baltic states» (Kaunas, 5-7 November 2015). – 2015. – P. 192 – 196.

11. Звонова И.А. Дозы и риски облучения детей при радионуклидных диагностических исследованиях / И.А. Звонова, Л.А. Чипига, М.И. Балонов, Е.П. Ермолина // Сб. тезисов конф. «Актуальные проблемы разработки, производства и применения радиофармацевтических препаратов - «РАДИОФАРМА-2015», 17-19 июня 2015 г. Москва, с. 98.

12. **Чипига Л.А.** Методы определения эффективной дозы у пациентов в компьютерной-томографии на примере исследований всего тела / Л.А. Чипига, Е.Н. Шлеенкова // III Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники / Сборник научных трудов. – СПб., 2016. – С. 75-78.

13. **Чипига Л.А.** Сравнение расчетных методов определения доз облучения у пациентов при компьютерно-томографических исследованиях / Л.А. Чипига // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора. Современные проблемы эпидемиологии и гигиены (Москва, 1-3 ноября 2016 г.); под ред. д-ра мед. наук, проф. А.Ю. Поповой.- М.: Грифон, 2016.- С. 244-245.

14. **Chipiga L.** Assessment of patient doses and possible approaches for implementation of optimization procedures in PET/CT examinations in the Russian Federation / L. Chipiga, A. Vodovatov, I. Zvonova, C. Bernhardsson // Proceedings of the 13th international conference on «Medical Physics in the Baltic States» (Kaunas, 9-11 November 2017). – 2017. – P. 36 – 40.

15. **Chipiga L.A.** Potential for the establishment of national CT diagnostic reference levels in the Russian Federation / L.A. Chipiga, A.V. Vodovatov, V.Yu. Golikov, I.A. Zvonova, C. Bernhardsson // Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. – Vienna, 2017. – IAEA, book of contributions.–P. 52–55: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session2.pdf>

16. Zvonova I.A. Trends on medical exposure and radiation protection in nuclear medicine in Russia / I. A. Zvonova, L. A. **Chipiga** // Proceedings of International Conference on Radiation Protection in Medicine: Achieving Change in Practice. – Vienna, 2017. – IAEA, book of contributions. – P. 188 – 192: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/02/rpop-session4.pdf>

17. **Чипига Л.А.** Оценка эффективной и органных доз у пациентов при КТ-исследовании всего тела / Л.А. Чипига, В.Ю.Голиков // Сб. тезисов Невского Радиологического Форума НРФ-2017. – СПб, 2017. – С. 261.

18. **Чипига Л.А.** Перспективы внедрения референтных диагностических уровней в компьютерной томографии в России / Л.А. Чипига // Материалы

Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы организации контроля и надзора за физическими факторами»/ Под редакцией доктора мед. наук, профессора А.Ю. Поповой. – Москва-Санкт-Петербург, 2017. – С. 456- 459.

19. **Чипига Л.А.** Оценка дозовых факторов в компьютерной томографии / Л.А. Чипига, В.В. Смирнов // Сб. материалов XII Всероссийского съезда гигиенистов и санитарных врачей «Российская гигиена – развивая традиции, устремляемся в будущее» (Москва, 17-18 ноября 2017 г.) / Под ред. А.Ю. Поповой, В.Н. Ракитского, Н.В. Шестопалова. – Том 1. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2017. – С. 785-788.

20. **Чипига Л.А.** Управление дозой в компьютерной томографии на примере органов грудной клетки / Л. А. Чипига, В. В. Смирнов, А. В. Водоватов // Сб. тезисов научно-практической конференции «Радиационная гигиена и радиационная безопасность государства: история, современное состояние и перспективы развития»: материалы научно-практической конференции. – М., 2017. – С. 66-68.

21. **Chipiga L.** Estimation of Organ and Effective Doses for CT Scan During Whole Body PET/CT examination. / L. Chipiga, V. Golikov, C. Bernhardsson // Eur J Nucl Med Mol Imaging. – 2017. Vol. 44 (Suppl 2). – P. S453.

22. **Чипига Л.А.** Уровни облучения пациентов и потенциальные пути оптимизации ПЭТ-диагностики в России / Л.А. Чипига, И.А. Звонова, Д.В. Рыжкова, М.А. Меньков, М.Б. Долгушин // Научные работы конгресса. I Всероссийский научно-образовательный конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия». С – 65.

23. Berkovich G. V. Evaluation of CT reconstruction algorithms influence on CT density values of nodules / G. V. Berkovich, **L. Chipiga**, A. Vodovатов, A. Boriskina, G. Trufanov // ECR 2018 / C-2788. DOI: 10.1594/ecr2018/C-2788.

24. Беркович Г.В. Оценка влияния алгоритмов реконструкции КТ изображений на плотность очагов в легких / Г.В. Беркович, **Л.А. Чипига**, А.В. Водоватов, А.Н. Борискина, Г.Е. Труфанов // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 162.

25. **Чипига Л.А.** Оптимизация проведения ПЭТ-КТ исследований / Л.А. Чипига // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 182.

26. **Чипига Л.А.** Установление референтных диагностических уровней для КТ исследований в российской федерации / Л.А. Чипига, И.А. Звонова // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 183.

27. Борискина А.Н. Перспективы применения принципа обоснования для защиты пациентов от медицинского облучения в Российской Федерации / А.Н. Борискина, А.В. Водоватов, И.Г. Камышанская, **Л.А. Чипига**, Г.В. Беркович // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – Т. 1, № 9. – С. 185.