

БЕРКОВИЧ
ГЛЕБ ВЛАДИМИРОВИЧ

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ИТЕРАТИВНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ В ВЫЯВЛЕНИИ ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ
ИЗМЕНЕНИЙ В ГРУДНОЙ КЛЕТКЕ У ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЕСШИХ ОПЕРАТИВНЫЕ
ВМЕШАТЕЛЬСТВА НА СЕРДЦЕ

14.01.13 – лучевая диагностика, лучевая терапия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Санкт-Петербург

2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации

Научный руководитель: доктор медицинских наук, профессор
Труфанов Геннадий Евгеньевич

Официальные оппоненты: Сперанская Александра Анатольевна
доктор медицинских наук, профессор кафедры рентгенологии и
радиационной медицины ФГБОУ ВО «Первый Санкт-
Петербургский государственный медицинский университет им.
акад. И.П. Павлова» Минздрава России

Гаврилов Павел Владимирович
кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник,
руководитель направления «Лучевая диагностика» ФГБУ
«Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт
фтизиопульмонологии» Минздрава России

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский
университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России

Защита состоится «__» _____ 2022г. в ____ час на заседании
диссертационного совета Д 208.054.02 при ФГБУ «Национальный медицинский
исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России (191014, Санкт-Петербург,
ул. Маяковского, д. 12)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского научно-
исследовательского нейрохирургического института им. А.Л. Поленова и на сайте:
<http://www.almazovcentre.ru>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор медицинских наук, профессор Иванова Наталия Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В последние годы в Российской Федерации (РФ) и зарубежных странах отмечается тенденция к росту уровней облучения пациентов при медицинском облучении (Петреев И.В., 2017; Маткевич Е.И., Иванов И.В., 2018; Онищенко Г.Г. и соавт., 2019; Rehani M.M. et al., 2020, Tsovyanov A.G. et al., 2021). Это обусловлено в первую очередь широким применением рентгеновской компьютерной томографии (КТ) в связи с ее высокой информативностью и относительной доступностью (Sulieman A., et al., 2021; Postorino M., et al., 2021; Tsovyanov A.G. et al., 2021). По данным формы 3-ДООЗ системы ЕСКИД за 2017 год доля КТ в количественном выражении в РФ составила 3,64%, при этом ее вклад в коллективную дозу от медицинского облучения превышает 50% (Балонов М.И. и соавт., 2017). За последние 5 лет вклад КТ в коллективную дозу вырос с 34% в 2013 до 50,5% в 2018 г., при этом индивидуальная доза увеличилась на 40% (Онищенко Г.Г. и соавт., 2019).

Компьютерно-томографические (КТ-) исследования ассоциированы с высокими индивидуальными дозами облучения пациентов, которые варьируют от 2 мЗв при КТ головного мозга до 90,4 мЗв при мультифазном сканировании органов брюшной полости (Кондратьев Е.В., 2013). Также актуальной проблемой остается проведение многократных повторных КТ-исследований пациентов, находящихся на обследовании и лечении в стационарах. Суммарная эффективная доза для таких пациентов может превышать 100 мЗв (Rehani M.M. et al., 2020). По данным некоторых авторов до 2% злокачественных новообразований может быть связано с медицинским облучением (Sulieman A., et al., 2021). В связи с этим применение КТ должно сопровождаться оптимизацией радиационной защиты пациентов (Чипига Л.А., 2019; Морозов С.П., 2020; Rehani M.M. et al., 2020; Sulieman A., et al., 2021). Однако, снижение доз облучения в лучевой диагностике всегда сопровождается снижением качества изображения, что требует изучения диагностической значимости низкодозовых протоколов и установления показаний к их применению (Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Иванов И.В., 2015). КТ органов грудной клетки является одним из наиболее часто проводимых лучевых исследований. В последние годы, в связи с распространением новой коронавирусной инфекции, количество проводимых КТ сканирований органов грудной клетки продолжает увеличиваться в связи с использованием в качестве метода диагностики первой линии или даже для скрининга (Сперанская А.А., 2020). Медианные значения эффективной дозы при этом исследовании в РФ варьируют в пределах 4,2-4,8 мЗв по данным 3ДООЗ за 2015-2020г, а по данным отдельных авторов могут достигать 8,2 мЗв, (Smith-Bindman R. et al., 2009). При этом благодаря высокой естественной контрастности

структур, возможна разработка низкодозовых оптимизированных протоколов КТ органов грудной клетки с сохранением диагностического качества изображения (Маткевич Е.И. и соавт., 2018; Tack D., 2010).

В кардиохирургических стационарах КТ органов грудной клетки является методом выбора при подозрении на наличие инфекционного процесса у пациентов после оперативных вмешательств (Попов Д.А., 2013; Hota P. et al., 2018; Foldyna B. et al., 2019). Диагностический процесс у таких пациентов осложняется схожестью клинических и рентгенологических признаков нормальных послеоперационных изменений с инфекционными осложнениями (Hota P. et al., 2018; Foldyna B. et al., 2019), особенно в первые 3 недели после операции, что в ряде случаев требует проведения повторных или даже многократных КТ-исследований (Гельфанд Б.Р., 2016). Помимо этого, актуальной задачей является выявление начальных слабовыраженных проявлений воспалительных изменений в легочной ткани (Тюрин И.Е., 2013). Однако при использовании оптимизированных протоколов с неконтролируемым снижением это становится затруднительно в связи с ухудшением качества КТ-изображения (Martini K. et al., 2015; Scholten E.T. et al., 2015). В последние годы перспективным направлением является использование алгоритмов итеративной реконструкции КТ-изображений (Вишневецкая А.В., Кондратьев Е.В., 2013; Geyer L.L. et al., 2015; Jensen K. et al., 2015; Hata A. et al., 2016; Stiller W., 2018; Sulieman A., et al., 2021).

Таким образом, актуальным вопросом является разработка низкодозовых протоколов сканирования органов грудной клетки, которые обладали бы доказанной диагностической ценностью в выявлении патологических изменений у пациентов после кардиохирургических вмешательств при сохранении минимальной лучевой нагрузки.

Степень разработанности темы

Вопросы оптимизации КТ органов грудной клетки, в том числе с применением итеративных реконструкций широко описаны в зарубежных источниках (Higuchi K. et al., 2013; Löve A., 2013; Goenka A.H. et al., 2014; Laqmani A. et al., 2016). Однако эти публикации не учитывают специфику выявления изменений в грудной клетке у пациентов, перенесших кардиохирургические вмешательства. Большинство исследований проведены с использованием фантомов, примитивно имитирующих тело пациента (Pontana F. et al., 2011; Löve A., 2013; Mathieu K.B. et al., 2014; Sakai N. et al., 2015; Laqmani A. et al., 2016). Результаты таких исследований не могут быть полноценно экстраполированы на пациентов. Часто авторы оценивают преимущественно физико-технические параметры изображения, в меньшей степени уделяя внимание диагностической значимости (Martini K. et al., 2015; Laqmani A. et al., 2016; Sauter A. et al., 2016). Другие авторы, наоборот, уделяют внимание преимущественно экспертной оценке качества изображений без сравнения с объективными

параметрами качества (Вишневская А.В., Кондратьев Е.В., 2013; Martini K. et al., 2015; Martini K. et al., 2017; Yangetal., 2017). Отсутствуют работы, которые бы демонстрировали комплексный подход к процессу оптимизации с комбинацией оценки физико-технических параметров качества и экспертной оценки качества изображения врачами-экспертами, проведения эксперимента на фантомах с дальнейшим переносом результатов на пациентов. Кроме того, не указываются конкретные минимальные значения дозовых характеристик, которые доказано, позволяли бы получать изображения диагностического качества. Отдельные авторы рекомендуют использовать для визуализации пневмоний низкодозовую КТ, однако при этом указывают на риск пропуска патологических изменений при использовании протоколов КТ со сниженной дозой и призывают использовать их с осторожностью (Beigelman-Aubry C., Schmidt S., 2016).

В отечественной литературе публикации по вопросу оптимизации в КТ носят описательный характер (Кондратьев Е.В., 2012; Вишневская А.В., Кондратьев Е.В., 2013; Маткевич Е.И., Сеницын В.Е., Иванов И.В., 2015; Гомболевский В.А., 2018; Маткевич Е.И и соавт., 2018; Чипига Л.А., 2019; Морозов С.П., 2020). Тем не менее, ряд авторов отмечает, что дозы облучения пациентов не должны снижаться за счет снижения диагностической значимости исследований (Кондратьев Е.В., 2012; Вишневская А.В., Кондратьев Е.В., 2013).

В вопросе применения итеративных реконструкций в литературе нет однозначного мнения. В части публикаций они признаются одним из наиболее перспективных методов поддержания качества КТ-изображения при снижении уровня доз облучения пациентов (Маткевич Е.И и соавт., 2018; Voas F.E., Fleischmann D., 2012; den Harder A.M et al., 2015). Однако другие публикации свидетельствуют о неоднозначном влиянии итеративных реконструкций на качество КТ-изображения (Laqmani A. et al., 2016; Aurumskjöld M-L. et al., 2017; Andersen H.K. et al., 2018; Afadzi M. et al., 2020).

Таким образом, отмечается низкая разработанность темы по конкретным параметрам протоколов КТ, которые позволяли бы получать изображения диагностического качества, в частности у пациентов после кардиохирургических вмешательств, с применением алгоритмов итеративных реконструкций.

Цель исследования – оптимизация протоколов КТ-сканирования органов грудной клетки у пациентов, перенесших кардиохирургические вмешательства.

Задачи

1. Провести анализ выявляемых при КТ органов грудной клетки изменений у пациентов после кардиохирургических вмешательств.
2. Разработать методику оценки качества КТ органов грудной клетки для данной группы пациентов.

3. Оценить влияние различных алгоритмов реконструкций на качество КТ-изображения.

4. Оценить потенциал снижения дозы для КТ органов грудной клетки за счет изменений параметров сканирования и применения итеративных реконструкций, разработать низкодозовый КТ-протокол для выявления послеоперационных изменений у пациентов после кардиохирургических вмешательств.

5. Определить нижние границы снижения дозы облучения для КТ органов грудной клетки у пациентов, перенесших кардиохирургические вмешательства.

Научная новизна

Разработана методика оптимизации проведения КТ органов грудной клетки, учитывающая параметры настроек протоколов сканирования, дозы облучения пациентов и качество КТ-изображения.

Впервые в отечественной практике разработана многоэтапная комплексная методика экспертной оценки качества КТ-изображения, включающая анализ физико-технических параметров изображения на аккредитационном фантоме, а также оценку качества изображения при выявлении патологических изменений с применением антропоморфного фантома и КТ-данных пациентов.

Разработаны низкодозовые протоколы сканирования органов клетки для пациентов, не уступающие по информативности качеству изображения, получаемые при использовании стандартного протокола.

Проведено комплексное сравнение физико-технических параметров и экспертных оценок изображений, полученных на различных уровнях дозы излучения, с применением гибридных и модельных алгоритмов итеративных реконструкций.

Доказана эффективность применения итеративных реконструкций для низкодозовых протоколов сканирования органов грудной клетки.

Впервые в отечественной практике доказана возможность снижения доз облучения пациентов вплоть до 2 раз, по сравнению с дозами при использовании стандартного протокола при проведении КТ органов грудной клетки с применением методов итеративных реконструкций без потери диагностического качества изображений для пациентов, перенёсших оперативные вмешательства на сердце.

Теоретическая и практическая значимость

Разработаны теоретические положения, эффективность которых подтверждена внедрением в клиническую практику оптимизированных низкодозовых протоколов КТ органов грудной клетки.

Впервые разработана методика имитации начальных воспалительных изменений в легких с использованием антропоморфного фантома органов грудной клетки с целью оценки диагностической значимости оптимизированных протоколов.

Проведен анализ различных подходов к оценке качества КТ-изображения в рамках оптимизации КТ-сканирования органов грудной клетки.

Проведен комплексный анализ патологических изменений в грудной клетке, встречающихся у пациентов после кардиохирургических вмешательств.

Впервые в отечественной практике разработан алгоритм многоэтапной комплексной оценки качества КТ-изображения при сканировании грудной клетки с применением различных фантомов и КТ-данных пациентов. Методика зарекомендовала себе как воспроизводимая, объективная и может быть экстраполирована на другие анатомические области. Данный алгоритм использовался при разработке методических указаний МУК 2.6.7.3652 -20 по методам контроля в КТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты.

Разработан низкодозовый протокол сканирования органов грудной клетки у пациентов после кардиохирургических вмешательств с двукратным снижением доз облучения пациентов с доказанной диагностической эффективностью.

Методология и методы исследования

Диссертационное исследование выполнялось в пять этапов.

На первом этапе изучалась отечественная и зарубежная литература, посвященная данной проблеме. Всего проанализировано 88 источников, из них – 43 отечественных, 45 – зарубежных. Ретроспективно были проанализированы наиболее распространённые КТ-изменения, встречающиеся у пациентов после кардиохирургических вмешательств, обследованных за 2018-2020 годы.

На втором этапе была проведена оценка физико-технических параметров качества стандартного и низкодозовых КТ-протоколов с применением алгоритмов итеративных реконструкций на аккредитационном фантоме.

На третьем этапе проведена комплексная оценка качества КТ-изображений для стандартного и низкодозовых КТ-протоколов на антропоморфном фантоме с имитаторами патологических изменений. В комплексную оценку были включены экспертная оценка качества изображений врачами-рентгенологами и оценка диагностической значимости изображения для выявления патологии. Были выбраны наиболее перспективные низкодозовые протоколы использования при обследовании пациентов.

На четвертом этапе обследованы 96 пациентов после кардиохирургических вмешательств с подозрением на наличие воспалительных изменений в легких и/или в зоне

оперативного вмешательства с применением стандартного и низкодозовых протоколов.

На пятом этапе работы проведен сравнительный анализ комплексной оценки качества стандартного и низкодозовых протоколов сканирования с применением итеративных реконструкций на основании экспертной оценки качества и диагностической значимости в выявлении патологических изменений у пациентов после кардиохирургических вмешательств. Была проведена статистическая обработка полученных результатов, выбран оптимизированный низкодозовый протокол, отвечающий критериям качества изображения для внедрения в клиническую практику.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. У пациентов после кардиохирургических вмешательств при КТ органов грудной клетки наиболее часто выявляется отек ретростернальной клетчатки, жидкостные скопления в плевральной полости, ретростернальные гематомы, компрессионные ателектазы и дискателектазы. Воспалительные изменения у данной группы пациентов выявляются значительно реже.

2. Мероприятия по снижению доз облучения пациентов требуют комплексной методики оценки качества изображения в целях сохранения их диагностической ценности. Целесообразно прогнозировать снижение качества изображения с использованием специализированных антропоморфных фантомов. Решения об использовании протоколов в клинической практике должны преимущественно базироваться на экспертной оценке качества, а не на оценке физико-технических параметров качества.

3. Качество КТ-изображения достоверно повышается при использовании алгоритмов итеративных реконструкций. Максимальные значения общей экспертной оценки качества изображения для визуализации нормальной КТ-анатомии и патологических изменений в грудной клетке наблюдаются при применении алгоритма модельных итеративных реконструкций.

4. При проведении КТ органов грудной клетки с применением итеративных реконструкций доза облучения пациентов может быть снижена до 2 раз по сравнению с дозой стандартного протокола без потери диагностического качества КТ-изображения. Более существенное снижение дозы облучения пациента (менее 1 мЗв) негативно сказывается на качестве КТ-изображения и требует отдельного обоснования для практического использования.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности полученных результатов проведенного исследования определяется значительным и репрезентативным объемом выборки обследованных пациентов (n=96), применением современных методов исследования и сертифицированного

оборудования при сканировании и анализе КТ-изображений, многоэтапным дизайном исследования, а также использованием современных методов математической статистики. На основании полученных данных сформулированы положения, выводы и практические рекомендации.

Апробация работы

Основные результаты работы доложены и обсуждены на: Невском радиологическом форуме (СПб., 2018, 2019), Российском конгрессе рентгенологов и радиологов (М., 2016), Всероссийской молодежной медицинской конференции с международным участием «Алмазовские чтения – 2018», Инновационном Петербургском медицинском форуме. – Трансляционная медицина (СПб., 2020), Европейском конгрессе радиологов (электронный постер; Вена 2018), заседаниях Санкт-Петербургского радиологического общества (СПб, 2018, 2019).

Апробация диссертационной работы проведена на совместном заседании Проблемной комиссии по сердечно-сосудистым заболеваниям и эндокринологии и НИО лучевой диагностики ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России (от 17.06.2021, номер протокола 147).

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, из них 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, в том числе 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе данных Scopus.

Внедрение результатов работы в практику

Результаты работы внедрены в работу отдела лучевой диагностики, а также используются в учебном процессе на кафедре лучевой диагностики и медицинской визуализации ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России.

Личный вклад автора

Тема и план диссертации, ее основные идеи и содержание разработаны совместно с научным руководителем на основе многолетних целенаправленных исследований.

Автор самостоятельно сформулировал и обосновал актуальность темы диссертации, цель, задачи и этапы научного исследования. Лично автором была создана электронная база данных пациентов.

Диссертант лично обследовал всех 96 пациентов, ретроспективно проанализировал базу данных пациентов за 2018-2020 годы, разработал методику оценки качества изображений и провел анкетирование врачей-экспертов.

Личный вклад автора в изучение литературы, сбор, обобщение, анализ полученных данных и написание диссертации – 100%.

Методы статистической обработки результатов исследования

По результатам обследования были сформированы базы данных в формате MS Excel. Статистический анализ выполнялся с помощью пакетов STATISTICA 10 (Stat Soft, Inc., Tulsa, OK, USA).

Для описания категориальных данных считали абсолютные частоты и проценты от общего количества наблюдений. Обработка категориальных данных проведена с использованием таблиц частот, таблиц сопряженности, критерия ХИ - квадрат или точного критерия Фишера (в случае малого число наблюдений). Достоверность различий между выборками категориальных данных определяли с использованием непараметрического теста Манна-Уитни. Различия считались достоверными при $p < 0,05$.

Для количественных данных была выполнена описательная статистика. Для описания количественных показателей использовали методы непараметрической статистики.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, состоит из введения, обзора литературы, главы с описанием пациентов и методов исследования, главы с результатами исследования, выводов и списком литературы, включающего 57 отечественных и 143 зарубежных источников. Работа иллюстрирована 28 таблицами и 28 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Общая характеристика обследованных пациентов

В исследование было включено 96 взрослых пациентов, перенесших кардиохирургическое вмешательство с подозрением на воспалительные изменения в грудной клетке, из них 76 мужчин (79,2%) и 20 женщин (20,8%). Масса тела пациентов составила 82 ± 13 кг (50-120), индекс массы тела $28,2 \pm 4,6$ кг/м² (20,0-42,5). Среднее количество дней после проведения кардиохирургической операции составило 19 ± 14 (7-100). Данные представлены в формате среднее \pm стандартное отклонение; минимум-максимум.

Сканирование 50 пациентов осуществляли с использованием стандартного протокола сканирования (контрольная группа), 46 пациентов – с использованием низкодозовых протоколов.

Разработка оптимизированного низкодозового КТ-протокола

Выбор протоколов сканирования проводили в три этапа, на каждом из которых оценивали качество КТ-изображения:

1. С применением аккредитационно фантома.
2. С применением антропоморфного фантома.
3. Сканирование пациентов после кардиохирургических вмешательств.

В соответствии с рекомендациями Mayo-Smith W.W. et al., (2014), в качестве эталонного протокола для первых двух этапов исследования был принят стандартный протокол, рекомендованный для данного томографа американским обществом физиков в медицине с уменьшением напряжения с 120 до 100 кВ (AdultRoutineChest CT Protocols Version 2.1 5/4/2016): 100 кВ, 142 мАс, CTDIvol 5,6 мГр).

Экспериментальные протоколы предусматривали снижение доз облучения пациентов на 50%, 25%, 12,5% и 7% от эталонного за счет снижения значений силы тока (мАс). При сканировании аккредитационного и антропоморфного фантомов были отключена система модуляции силы тока для более точного контроля дозы облучения. Для клинического этапа эксперимента были использованы технологии модуляции силы тока (3D-модуляция по оси Z и по осям XY), а напряжение на рентгеновской трубке в эталонном протоколе составляло 120 кВ.

Для реконструкций изображений были выбраны следующие алгоритмы итеративных реконструкций: FBP (метод фильтра обратных проекций), iDose (гибридные итеративные реконструкции); IMR (модельные итеративные реконструкции).

На первом этапе исследования оценены физико-технические параметры КТ-изображения. Были выбраны следующие характеристики: точность определения единиц Хаунсфилда, уровень шума, шумовой спектр (noise power spectrum, NPS), соотношение контраст/шум (contrast to noise ratio, CNR), уровень пространственного разрешения и функцию передачи модуляции (modulation transfer function, MTF). Для оценки объективных параметров использовали аккредитационный фантом, предназначенный для контроля качества изображения компьютерных томографов при пусковых, периодических и текущих испытаниях в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61223-2-6-2001 п. 5.1.2., 5.2.2., 5.3.2. - СТ ACR 464 Phantom (Рисунок 1) (Mc Collough C.H. et al., 2004, ACR CT аккредитационный фантом для компьютерной томографии. Руководство по эксплуатации. Научно-производственное предприятие «Доза»). Обработку всех изображений фантома ACR проводили с использованием специализированного программного обеспечения Image J.

Второй этап исследования включал экспертную оценку качества КТ-изображения врачами-рентгенологами, оценку диагностической значимости изображений в выявлении очагов по типу «матового стекла». Для этого этапа был использован антропоморфный фантом Kagaku Chest Phantom N1 Lungman, (Япония) (Рисунок 1).

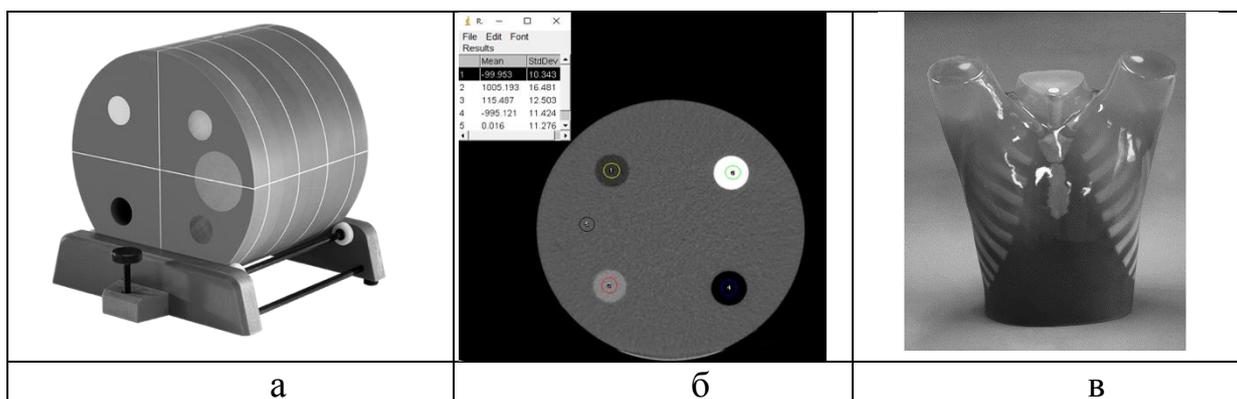


Рисунок 1 – Используемые фантомы. а – внешний вид ACR-фантома; б – аксиальный срез КТ-изображения ACR-фантома при обработке в Image J; в – антропоморфный фантом KagakuChestPhantom N1 Lungman

Фантом Lungman является разборным, внутрь него могут быть помещены структуры, имитирующие патологические изменения. Для приближения задачи к реальным условиям проанализирована база данных КТ-изображений органов грудной клетки пациентов в течение 2 лет (2018-2020 гг.). На подготовительном этапе работы было определено, что очаговые изменения в легких оказались наиболее пригодными для имитации патологических изменений в фантоме. Для экспертной оценки изображения выбран синдром очаг по типу «матового стекла» как наиболее сложный для визуализации в виду его невысокой плотности, меньшей контрастности на фоне легочной паренхимы. При этом данный синдром приближен к патологическим изменениям, которые могут наблюдаться у пациентов в начальной стадии воспалительных изменений. Были разработаны имитаторы очагов, которые были распределены в фантоме в количестве 10 штук (Рисунок 2).

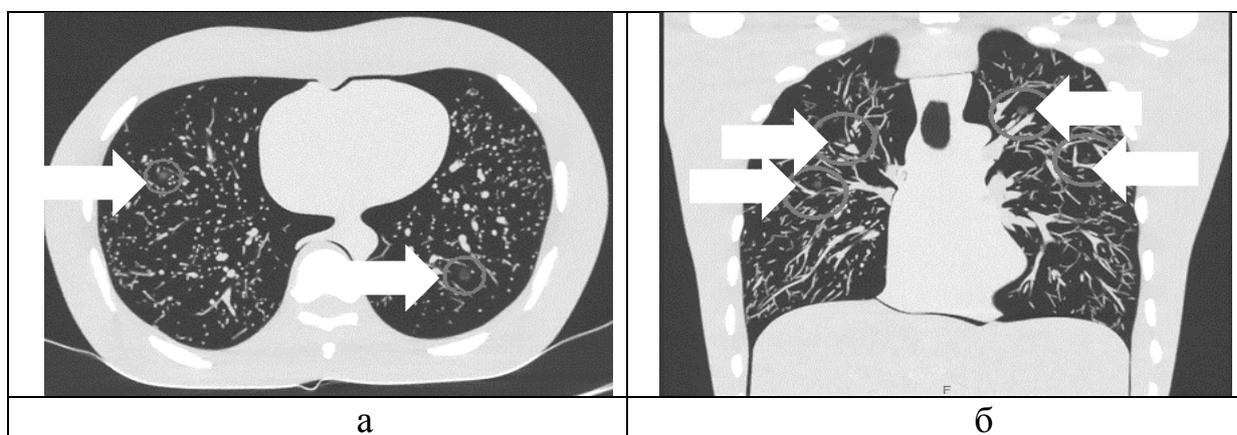


Рисунок 2 – КТ-изображения имитаторов очагов в фантоме. В легких визуализируются очаговые уплотнения по типу «матового стекла» (указаны стрелками)

Для экспертной оценки качества КТ изображений были привлечены 10 сертифицированных врачей-рентгенологов с опытом работы в КТ от 3 до 20 лет. Для оценки субъективных параметров разработана анкета-опросник, включающая в себя следующие вопросы:

- 1 – есть ли очаг на изображении?
- 2 – какое количество очагов Вы видите?
- 3 – есть ли сомнения в наличии очагов?
- 4 – оцените качество изображения по шкале от 1 до 5 исходя из Вашей субъективной оценки.

В результате первых двух этапов эксперимента на основании анализа оценки физико-технических параметров и экспертной оценки качества изображения, проводился выбор двух наиболее перспективных низкодозовых протоколов сканирования, которые позволяют получать изображения удовлетворительного качества.

Выбранные настройки низкодозовых протоколов были использованы для третьего этапа работы. Сканирование контрольной группы пациентов проводили на стандартном протоколе сканирования, для исследуемой группы пациентов сканирование проводилось 2 раза с применением протоколов, разработанных на первом и втором этапах работы и выбранных в качестве наиболее перспективных: первое сканирование с использованием протокола с дозой 50% от стандартного; второе сканирование – с 25% от стандартного (низкодозовый и ультранизкодозовый соответственно). Таким образом, суммарная доза облучения, получаемая пациентом в исследуемой группе, оставалась ниже, чем при сканировании на стандартном протоколе.

Экспертную оценку проводили 5 врачей-рентгенологов (стаж работы в КТ 5-10 лет). Каждый врач получал набор из 18 КТ-исследований (Таблица 1). Для оценки качества изображения разработан опросник, основанный на европейских критериях качества КТ-изображения (Bongartz G. Et al., 1999).

Таблица 1 – Итоговая выборка пациентов для проведения экспертной оценки качества КТ-изображения

| Алгоритм | Стандартный протокол | ИМТ | Низкодозовый протокол | ИМТ | Ультранизкодозовый протокол | ИМТ |
|--------------|----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------------|------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Алгоритм IMR | Пациент 1 | 27,1 | Пациент 7 | 28,7 | Пациент 13 | 25 |
| | Пациент 2 | 29,8 | Пациент 8 | 22,3 | Пациент 14 | 32,6 |
| | Пациент 3 | 24,5 | Пациент 9 | 22,6 | Пациент 15 | 29,7 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|-----------|------|------------|------|------------|------|
| Алгоритм iDose | Пациент 4 | 38 | Пациент 10 | 23,7 | Пациент 16 | 24,8 |
| | Пациент 5 | 24,9 | Пациент 11 | 32 | Пациент 17 | 22,6 |
| | Пациент 6 | 24,4 | Пациент 12 | 33,9 | Пациент 18 | 36,3 |

Для оценки качества КТ-изображения использовали следующие параметры:

1. Общий балл за изображение патологических изменений (определялся как сумма всех баллов по каждой категории – минимально – 7, максимально 35). Порог приемлемых значений составил 21 балл.

2. Общий балл за изображение нормальной анатомии органов грудной клетки (определялся как сумма всех баллов по каждой категории – минимально – 6, максимально 30). Порог приемлемых значений составил 18 баллов.

3. Общая характеристика изображения (от 1 до 5, пороговое значение – 3).

Отдельно оценивали диагностическую значимость КТ-изображений, в выявлении патологических изменений. Первоначальная визуализация патологических изменений проводилась двумя врачами-рентгенологами со стажем в кардиоторакальной визуализации 8 и 10 лет. На основании их интерпретации изображений разработан ключ для оценки полученных результатов. Расхождения с ключом были поделены на 3 группы:

1. Ошибки первой категории, связанные с нераспознаванием значимой патологии.
2. Ошибки второй категории, связанные с нераспознаванием патологических изменений, не оказывающих влияние на ведение пациента.
3. Ошибки третьей категории – расхождения в интерпретации выявленных патологических изменений, не влияющие на ведение пациента.

Результаты комплексной оценки качества КТ-изображения

На первом этапе работы при оценке физико-технических параметров изображения с использованием аккредитационного фантома определено, что все изученные режимы для трех алгоритмов реконструкций в равной мере соответствуют имеющимся рекомендациям, что не позволяет выбрать наилучший режим, только исходя из оценки технических параметров изображения.

По параметрам MTF, CNR и NPS показано достоверно более высокое качество изображений, полученных с применением алгоритма реконструкции IMR по сравнению с FBP и iDose. Реконструкция IMR характеризовались значительно меньшим уровнем шума и более высокими значениями CNR и MTF (Рисунок 3). По остальным параметрам значимых различий зарегистрировано не было. Также отмечено, что изображения, полученные с использованием

алгоритма IMR, обладают иными физико-техническими характеристиками, обуславливающими в том числе и непривычный вид КТ-изображения.

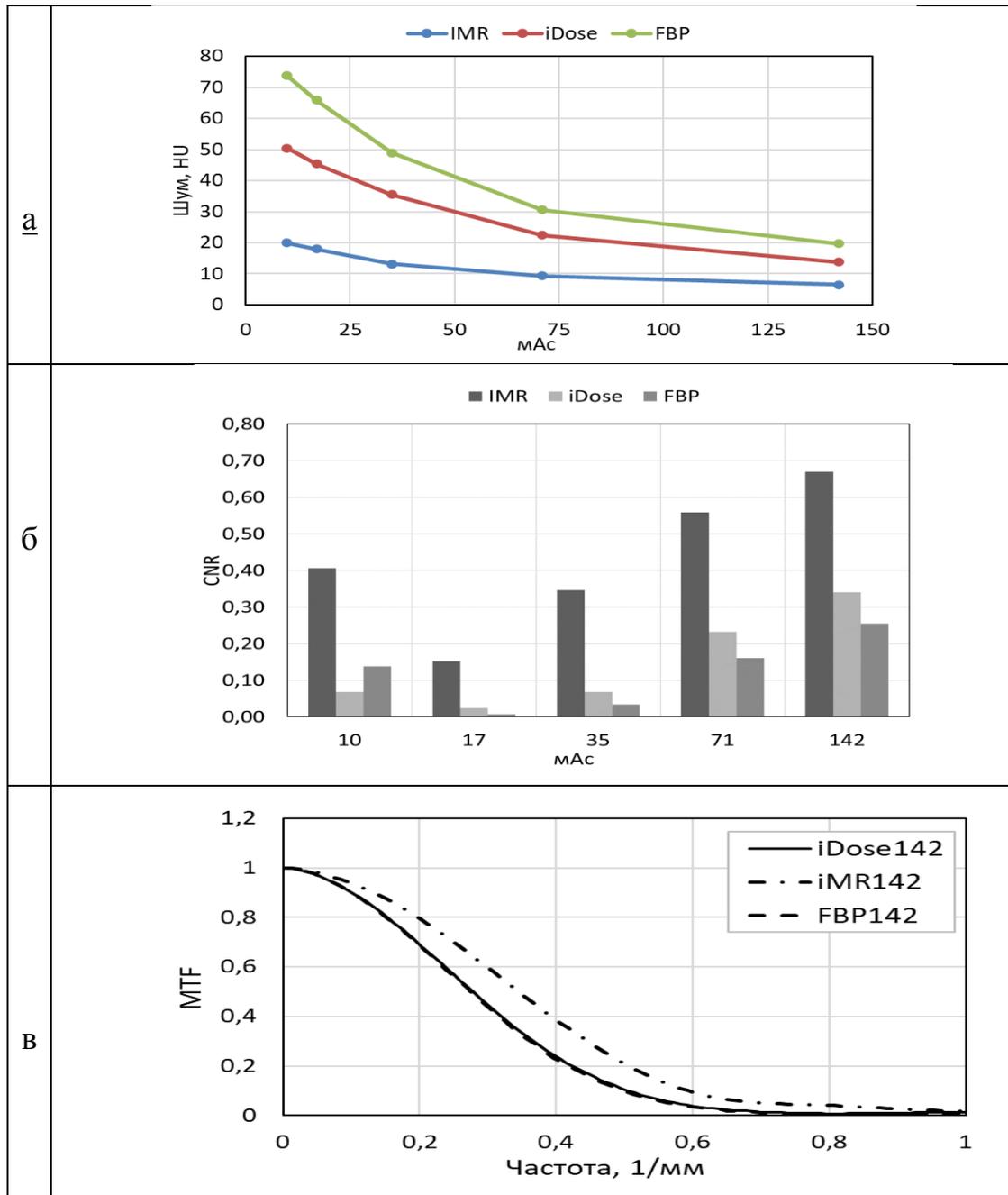
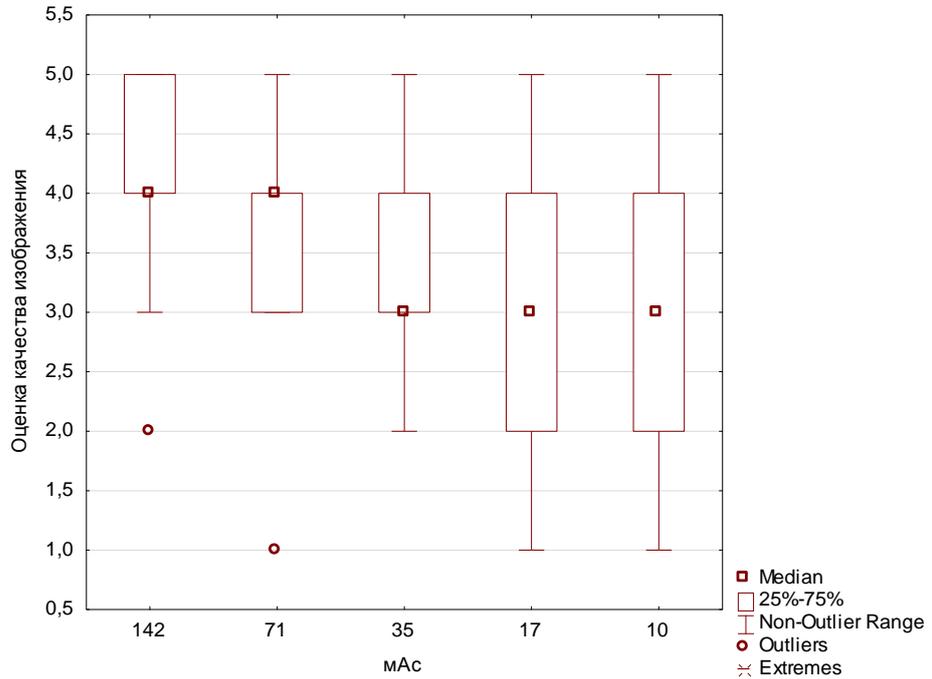


Рисунок 3 – Зависимость для разных реконструкций от экспозиции: а – шума на изображении, б – CNR, в – MTF

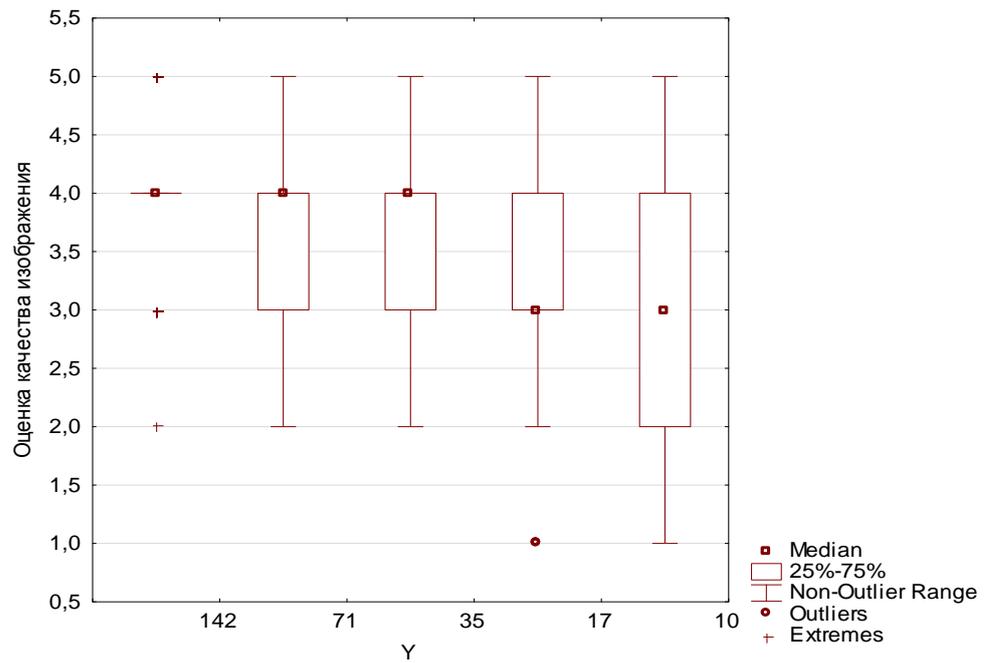
На втором этапе работы при проведении экспертной оценки качества КТ-изображения, полученных при сканировании антропоморфного фантома было выявлено достоверное различие в оценках качества изображения для всех трех алгоритмов реконструкции для протоколов сканирования 142, 71, 35 и 17 мАс. Для протокола 10 мАс достоверных различий определено не было. При этом для каждого значения экспозиции более высокие оценки

наблюдалась для протокола IMR, затем для iDose (Рисунок 4). Изображения, полученные с помощью протокола FBP, обладали достоверно меньшей оценкой.

A. FBP



BiDose



В. IMR

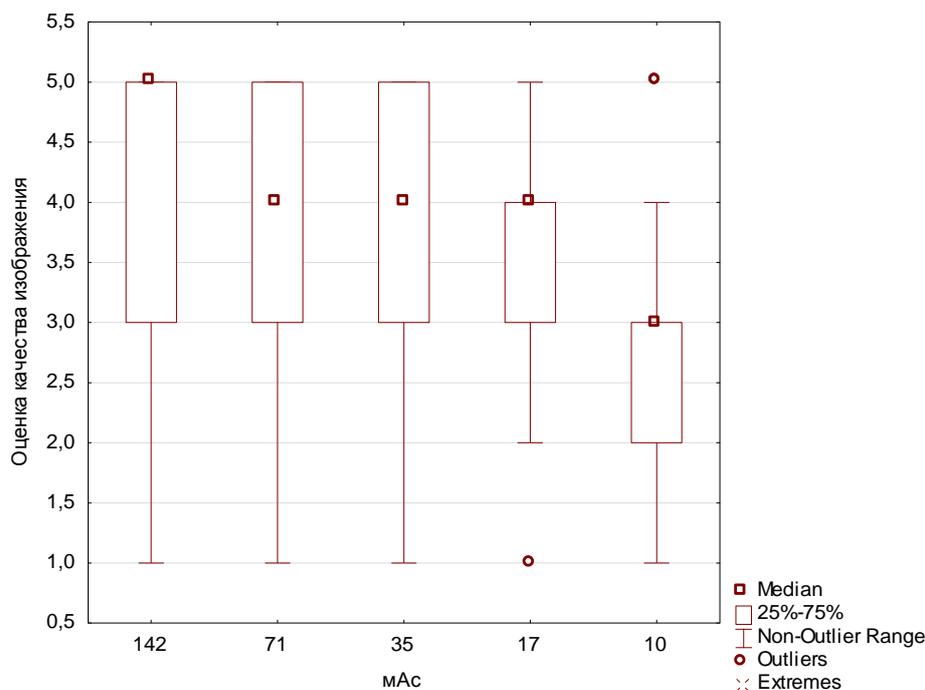


Рисунок 4 – Результаты распределения оценок качества КТ-изображений в зависимости от мАс для – протокола FBP, б – протокола iDose, в – протокола IMR

Был проведен анализ количества диагностически неприемлемых изображений, непригодных для диагностики (Таблица 2).

Таблица 2 – Количество неприемлемых КТ-изображений (в % от общего количества)

| Алгоритм | 142Ас | 71 мАс | 35 мАс | 17 мАс | 10 мАс |
|----------|-------|--------|--------|--------|--------|
| FBP | 1 | 1 | 9 | 36 | 46 |
| iDose | 1 | 1 | 8 | 16 | 36 |
| IMR | 1 | 4 | 6 | 13 | 27 |

Из таблицы 2 следует, что количество неприемлемых изображений было незначительным для всех видов реконструкций изображений на высоких значениях силы тока (142 и 71 мАс), однако процент непригодных изображений возрастал на уровне дозы 35мАс, и достигал максимально 46% при на минимальных значениях дозы. Отсутствуют достоверные различия между стандартным протоколом (142мАс) и протоколом со снижением дозы обучения в 2 раза (71мАс). Все остальные протоколы достоверно отличаются от протоколов 142мАс и 71мАс и между собой (тест Манна-Уитни, $p < 0,05$).

Из таблицы 3 следует, что количество ложноположительных и ложноотрицательных значений закономерно повышается по мере уменьшения дозы облучения. По количеству ложноположительных ответов для алгоритма FBP отсутствуют достоверные отличия между протоколами 142мАс и 71мАс, остальные протоколы достоверно отличаются между собой;

для алгоритма iDose отсутствуют достоверные различия между протоколами; для алгоритма IMR достоверно не отличаются между собой протоколы 142мАс и 71 мАс, а также протоколы 35мАс и 17мАс, протокол 10 мАс достоверно отличается от протоколов с более высокой дозой. По количеству ложноотрицательных ответов для алгоритма FBP отсутствуют достоверные различия между протоколами 142 мАс, 71 мАс и 35 мАс, а также между протоколами 17мАс и 10мАс; для алгоритмов iDose и IMR достоверные отличия имеются только для протокола 10мАс. Различия считались достоверными при $p < 0,05$. Данные результаты свидетельствуют о непригодности протоколов 17 мАс и 10 мАс для применения в клинической практике.

Таблица 3 – Количество ошибочных интерпретаций КТ-данных в зависимости от выбранных настроек протокола сканирования

| Категория ответа | Алгоритм | 142 мАс | 71 мАс | 35 мАс | 17 мАс | 10 мАс | Итого ошибок |
|------------------|----------|---------|----------|---------|---------|----------|--------------|
| FP | FBP | 0 | 0 | 7 | 5 | 3 | 15 (3%) |
| | iDose | 8 | 1 | 3 | 3 | 7 | 22 (4,4%) |
| | IMR | 0 | 2 | 6 | 7 | 14 | 29 (5,8%) |
| FN | FBP | 0 | 0 | 0 | 8 | 6 | 14 (2,8%) |
| | iDose | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 8 (1,6%) |
| | IMR | 0 | 0 | 1 | 0 | 11 | 12 (2,4%) |
| Итого ошибок | | 9 (3%) | 4 (1,3%) | 18 (6%) | 24 (8%) | 45 (15%) | - |

В результате двух первых этапов эксперимента было проведено сравнение физико-технической оценки качества изображения и экспертной оценки качества КТ-изображений антропоморфного фантома. Полученные результаты свидетельствовали о том, что неконтролируемое снижение дозы приводит к снижению диагностической значимости исследования (что может не отражаться на физико-технических параметрах изображения). На основании полученных данных, для клинической апробации наиболее подходящими признаны протоколы Экспериментальный-1 (71мАс, низкодозовый) и Экспериментальный -2 (35 мАс, ультранизкодозовый). В ходе третьего этапа работы при оценке диагностической значимости изображений проанализированы результаты КТ-исследований пациентов после кардиохирургических вмешательств за 2018-2020г. Средняя эффективная доза облучения пациентов составила 4,3мЗв. Наиболее распространенными изменениями являются: отек ретростеральной клетчатки (100%), жидкостные скопления в плевральной полости (65,6%), ретростеральные гематомы (55,2%), дискателектазы (49%) и компрессионные ателектазы (42,7%). Очагово-

инфильтративные изменения в легких выявлены в 16,7% случаев, медиастинит в 2,1%, воспалительные инфильтраты в 1%.

Также была проведена оценка диагностической ценности протоколов (Таблица 4).

Таблица 4 – Распределение случаев ошибочной интерпретации результатов КТ в зависимости от выбранного протокола сканирования (абсолютные значения)

| Категория ошибок | iDose | | | IMR | | |
|--------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|
| | Стандартный протокол | Низкодозовый протокол | Ультранизкодозовый протокол | Стандартный протокол | Низкодозовый протокол | Ультранизкодозовый протокол |
| Ошибки 1 категории | - | - | 4 | - | - | 2 |
| Ошибки 2 категории | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 12 |
| Ошибки 3 категории | 10 | 11 | 10 | 4 | 3 | 12 |

Из таблицы 4 следует, что количество ошибок возрастает при использовании низкодозовых протоколов. Ультранизкодозовый протокол характеризуется наибольшим количеством ошибок. При его применении сканирования отмечается появление ошибок первой категории (не распознавание значимой патологии), что делает их непригодными для клинического применения.

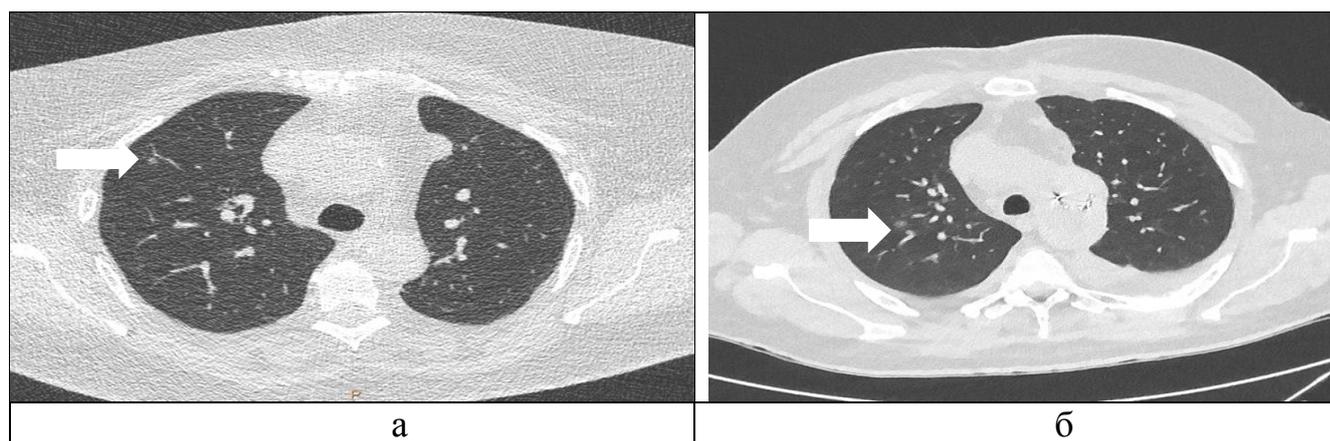
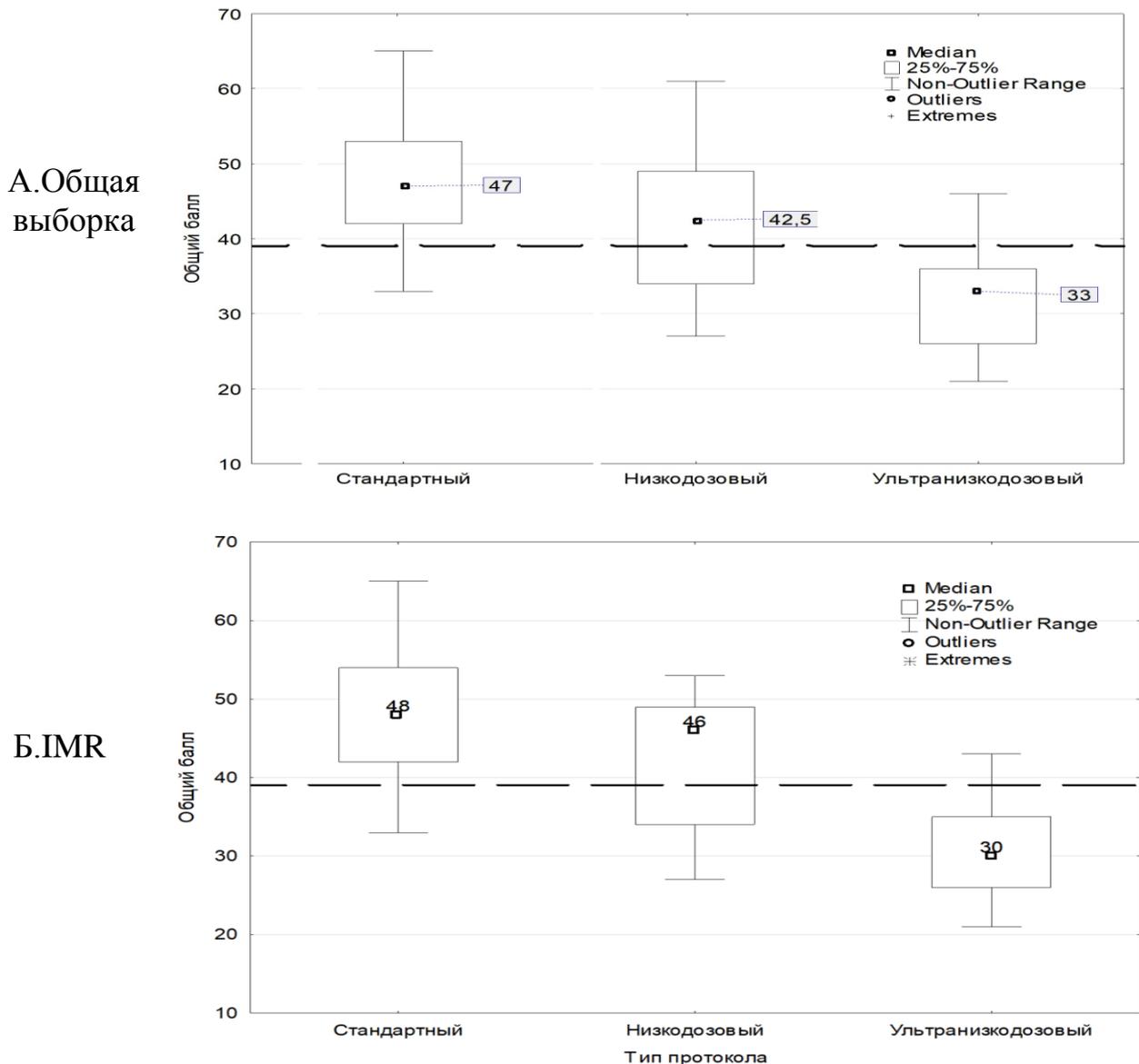


Рисунок 6 – Пример ошибок первой категории. а – пропуск немногочисленных сгруппированных очагов по типу «матового стекла», вероятно воспалительного генеза в верхней доле правого легкого (4 врача из 5), ультранизкодозовый протокол, реконструкция iDose (стрелка); б – пропуск аналогичных очагов в верхней, средней долях правого легкого (2 врача из 5), ультранизкодозовый протокол, реконструкция IMR (стрелка) (и/б 3866/C2020, и/б 9012/C2020)

Проведен анализ качества КТ-изображений по трем выбранным параметрам: общая оценка качества изображения, оценка качества визуализации нормальных анатомических структур и оценка качества визуализации патологических изменений. В результате не выявлено достоверных различий между стандартным и низкодозовым протоколами вне зависимости от использованного алгоритма реконструкции. При использовании ультранизкодозового протокола отмечены значимо более низкие оценки экспертов по всем трем параметрам по сравнению с стандартным и низкодозовым протоколами. Ультранизкодозовый протокол достоверно отличается (имеет более низкие оценки) для обоих методов реконструкции. Данное обстоятельство позволяет судить о приемлемости использования низкодозового протокола в качестве альтернативы стандартному. Ультранизкодозовый протокол по результатам оценок не может быть рекомендован в качестве альтернативы стандартному в связи с большим количеством неприемлемых оценок (Рисунок 7).



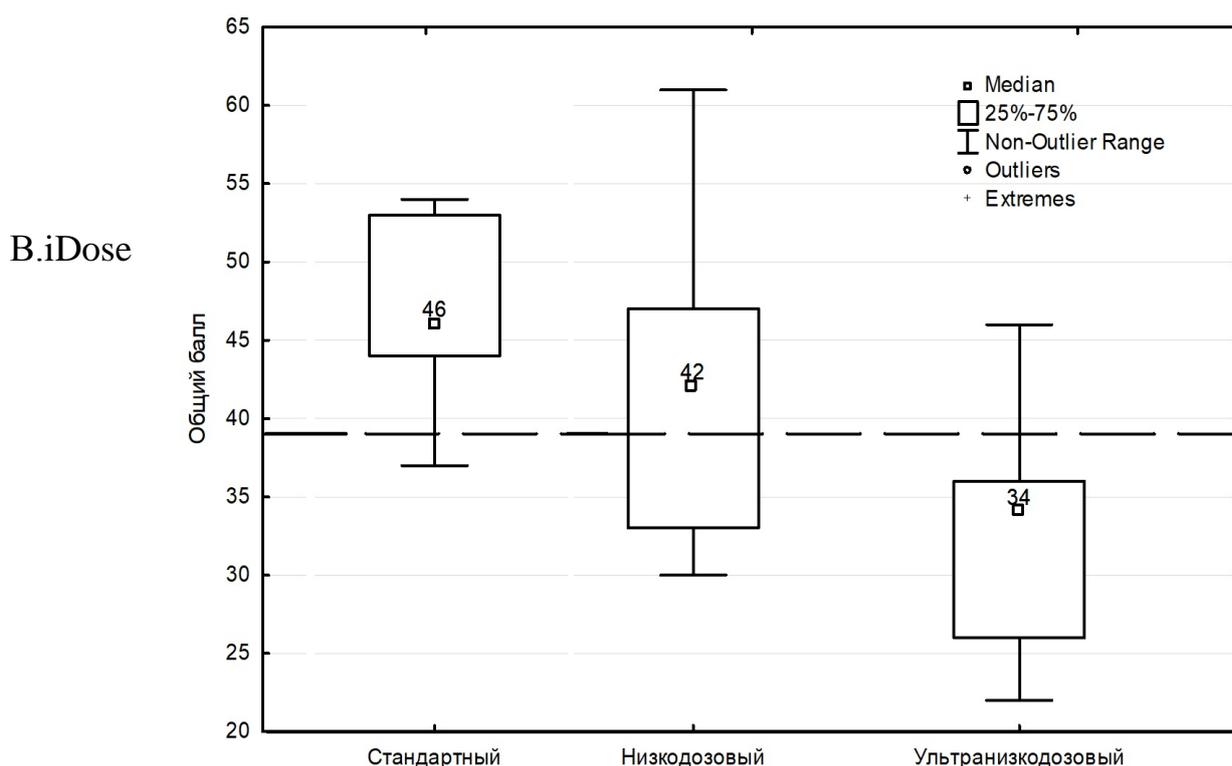


Рисунок 7 – Сравнение качества визуализации нормальных и патологических структур (общий балл) между стандартным и низкодозовыми протоколами. а – общая выборка; б – алгоритм IMR

Примечание: в – алгоритм iDose. Пунктирной линией отмечен порог приемлемых значений – 39 баллов

Отдельные аномально низкие оценки различных параметров качества изображения, в том числе и для КТ изображений, выполненных на стандартных протоколах, объясняются наличием в выборке большого числа пациентов с избыточной массой тела (ИМТ более 25 кг/м²). Отмечено достоверно более низкое качество изображения для пациентов с избыточной массой тела при сканировании на низкодозовом и ультранизкодозовом протоколах с применением метода реконструкции iDose.

Для метода реконструкции IMR достоверные различия между пациентами с нормальной и избыточной массой тела для всех протоколов отсутствовали. Примеры изображений, полученных на различных настройках, приведены на рисунке 8.

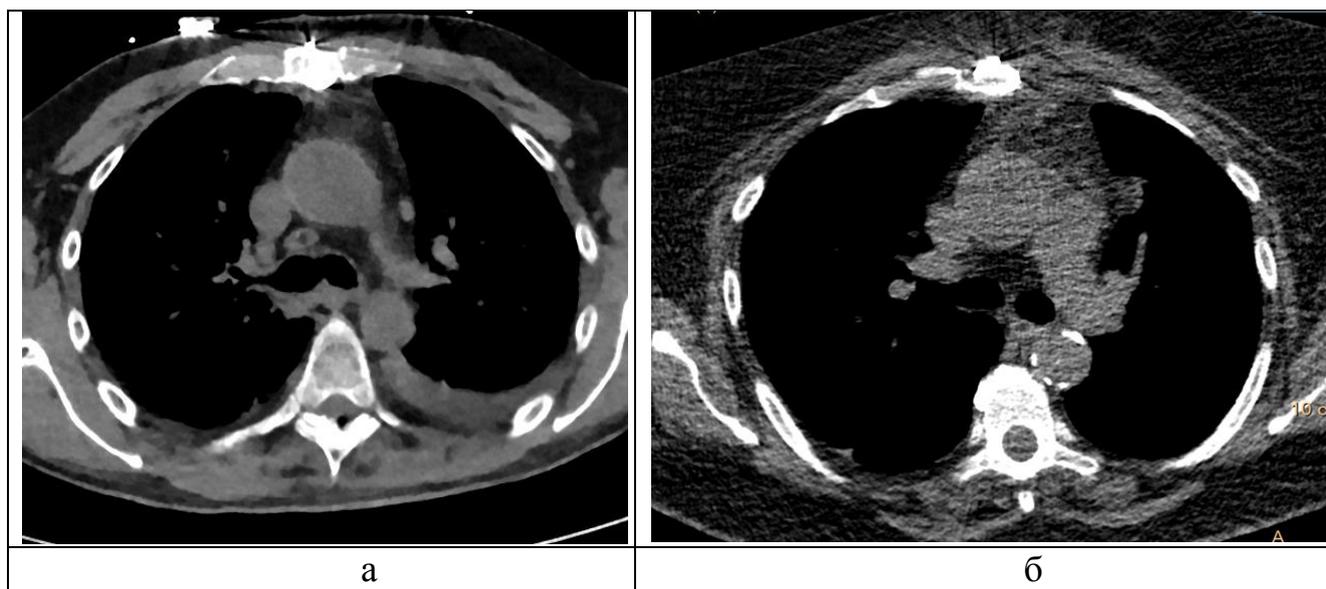


Рисунок 8 – КТ-изображения в мягкотканном окне. а – полученные на низкодозовом протоколе с применением алгоритма IMR (нормостеничный пациент); б – полученные на низкодозовом протоколе с применением алгоритма iDose (гиперстеничный пациент). Высокий уровень шума на изображениях с реконструкцией iDose, затрудняет их анализ (и/б 27283/C2021, и/б 19250/C2020).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан и внедрен в клиническую практику новый протокол низкодозового сканирования грудной клетки, эффективная доза которого составила $\sim 1,7$ мЗв, что в 2 раза ниже дозы, получаемой при применении стандартного протокола, при полном сохранении его диагностической значимости.

В отличие от работ других авторов (Higuchi K. et al., 2013; Löve A. 2013; Mathieu K.B., et al., 2014; Goenka A.H., et al., 2014; Sakai N. et al., 2015; Laqmani A. et al., 2016), применение комплексной оценки качества изображений при разработке оптимизированного протокола позволяет достоверно судить о его диагностической значимости и применимости в клинической практике. Применение многоэтапного дизайна разработки оптимизированного протокола позволило минимизировать лучевую нагрузку на пациентов, проведя предварительный отбор наиболее пригодных протоколов с использованием фантомов.

Результатом данной работы является предложенный низкодозовый протокол сканирования органов грудной клетки, который может быть использован для оценки состояния пациентов, перенесших оперативные вмешательства на сердце, а также в других клинических ситуациях, требующих повторных или многократных КТ-исследований.

ВЫВОДЫ

1. Наиболее часто встречающимися патологическими изменениями, выявленными у пациентов, перенесших оперативные вмешательства на сердце, являются: отек ретростеральной клетчатки, жидкостные скопления в плевральной полости, ретростеральные гематомы, компрессионные ателектазы и дискателектазы.

2. Разработанная методика оценки качества КТ-изображения, включает имитацию патологических изменений, применение критериев качества изображения с использованием специализированного антропоморфного фантома и может быть использована для оптимизации новых протоколов сканирования органов грудной клетки и других анатомических областей.

3. Применение алгоритмов итеративной реконструкции изображений позволяет повысить качество КТ-изображения, что особенно важно при разработке низкодозовых протоколов сканирования. По результатам экспертной оценки качества КТ-изображения, достоверно более высоким качеством обладают изображения, полученные с применением модельных алгоритмов итеративной реконструкции.

4. Разработан низкодозовый протокол сканирования органов грудной клетки, который по результатам комплексной оценки качества КТ-изображений характеризуется эффективной дозой облучения пациента вдвое ниже дозы стандартного, и соответствующим стандартному диагностическим качеством. Данный протокол может быть использован для пациентов после кардиохирургических вмешательств, и для других групп пациентов, нуждающихся в повторных или многократных КТ-исследованиях органов грудной клетки нормального и астеничного телосложения.

5. Чрезмерное снижение дозы облучения пациентов до уровня менее 1,0 мЗв приводит к значительному снижению диагностической точности, что не позволяет рекомендовать такие протоколы для оценки состояния пациентов после перенесенных оперативных вмешательств на сердце.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Выбор протокола КТ-сканирования должен основываться на диагностической задаче, кратности проводимых КТ-исследований, а также учитывать антропометрические параметры пациента.

2. При разработке и внедрении новых протоколов КТ-сканирования необходимо проводить комплексную оценку качества КТ-изображения. Низкодозовые протоколы целесообразно использовать в клинической практике с осторожностью в связи со значительным снижением уровня качества изображений.

3. Комплексная оценка качества КТ-изображения должна включать в себя оценку физико-технических параметров изображения и экспертную оценку качества изображения. Для повышения качества изображения целесообразно использовать методы модельных итеративных реконструкций.

4. Использование низкодозовых протоколов показано пациентам с ИМТ $<25 \text{ кг/м}^2$, перенесших оперативные вмешательства на сердце, для выявления воспалительных изменений в грудной клетке и оценке динамики выявленных изменений.

5. Ультранизкодозовые протоколы с эффективной дозой менее $1,0 \text{ мЗв}$ не рекомендованы для клинического применения для выявления воспалительных изменений в грудной клетке у пациентов после кардиохирургических вмешательств в виду значимо большего количества ошибок при анализе, а также неудовлетворительных экспертных оценок качества изображений.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие перспективы могут быть связаны с разработкой протоколов сканирования для других анатомических областей (брюшная полость, малый таз и др., всего тела). Перспективным является разработка оптимизированных протоколов для пациентов с избыточной массой тела. Кроме того, появление на рынке новых алгоритмов итеративных реконструкций позволит усовершенствовать уже разработанные протоколы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Беркович, Г.В. Снижение дозы ионизирующего излучения при компьютерной томографии органов грудной клетки с использованием итеративных модельных реконструкций после оперативных вмешательств на сердце и аорте / Г.В.Беркович // Материалы Юбилейного Конгресса Российского общества рентгенологов и радиологов. – СПб. – 2016. – С. 28.

2. Беркович, Г.В. Оценка параметров качества КТ-изображений, полученных с использованием различных поколений алгоритмов реконструкций / Г.В. Беркович // Лучевая диагностика и терапия. – 2017. – №3(8). – С. 109-110.

3. Беркович, Г.В. Оценка влияния алгоритмов реконструкции КТ-изображений на плотность очагов в легких / Г.В. Беркович, Л.А. Чипига, А.В. Водоватов и соавт. // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – №1(9). – С.162.

4. Беркович, Г.В. Перспективы применения принципа обоснования для защиты пациентов от медицинского облучения в Российской Федерации / А.Н. Борискина, А.В. Водоватов, Г.В. Беркович и соавт. // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. – №1(9). – С. 185.

5. Berkovich, G.V. Evaluation of CT reconstruction algorithms influence on CT density values of nodules / G. V. Berkovich, L. Chipiga, A. Vodovатов et al. // ECR. – 2018. – P. 2788.

6. Беркович, Г.В. Влияние различных поколений реконструкций КТ-изображений на плотностные характеристики очагов в легких / Г.В. Беркович, Л.А. Чипига, А.В. Водоватов, А.Н. Борискина // Всероссийская молодежная медицинская конференция с международным участием «Алмазовские чтения – 2018». – Трансляционная медицина. – Приложение 3. – 2018. – С. 510.

7. Беркович, Г.В. Имитация очаговых образований в легких для оценки диагностического качества изображения с использованием антропоморфных фантомов / Г.В. Беркович, А.В. Водоватов, И.Г. Камышанская и соавт. // Лучевая диагностика и терапия. – 2019. – №1(s). – С. 50-51.

8. Беркович, Г.В. Выявление очагов по типу матового стекла в легких с использованием низкодозовых протоколов и различных алгоритмов итеративных реконструкций / Г.В. Беркович, А.В. Водоватов, Л.А. Чипига, Г.Е. Труфанов // Лучевая диагностика и терапия. – 2019. – №1 (s) – С. 51-52.

9. Беркович, Г.В. Оптимизация низкодозового протокола сканирования органов грудной клетки в диагностике очагов по типу «матового стекла» с применением алгоритмов итеративных реконструкций / Г.В. Беркович, Л.А. Чипига, А.В. Водоватов и соавт. // **Лучевая диагностика и терапия. – 2019. – №4. – С. 20-32.**

10. Беркович, Г.В. Сравнение различных подходов к оценке диагностического качества компьютерной томографии органов грудной клетки / Г.В. Беркович, Л.А. Чипига, А.В. Водоватов, Г.Е. Труфанов // **Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – №3. – С. – 44-55.**

11. Беркович, Г.В. Компьютерная томография с использованием модель-базированных итеративных реконструкций в клинической практике / А.Ю. Силин, И.С. Груздев, А.И. Мещеряков и соавт. // **Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – №3. – С. – 14-19.**

12. Беркович, Г.В. Сравнение методов оценки качества изображения в компьютерной томографии / Л.А. Чипига, Г.В. Беркович, А.В. Водоватов // Сборник тезисов VII Всероссийской научно-практической конференции производителей рентгеновской техники. – 2020. – С. 60-63.

13. Беркович, Г.В. Возможности применения модель-базированных итеративных реконструкций при компьютерной томографии легких / А.Ю. Силин, И.С. Груздев, Г.В. Беркович и соавт. // **Медицинская визуализация. – 2020. – №3. – С. – 107-113.**

14. Беркович, Г.В. Физико-технические параметры в оценке диагностического качества компьютерной томографии органов грудной клетки / Г.В. Беркович, А.В. Водоватов,

Л.А. Чипига, Г.Е. Труфанов// III Инновационный Петербургский медицинский форум. – Трансляционная медицина. – 2020. – Приложение №2. – С. – 203-204.

15. Беркович, Г.В. Возможности компьютерной томографии органов грудной клетки пациентов после кардиохирургических вмешательств / Г.В. Беркович// III Инновационный Петербургский медицинский форум. – Трансляционная медицина. – 2020. – Приложение №2. – С. 206-207.

16. Беркович, Г.В. Методы контроля в КТ-диагностике для оптимизации радиационной защиты: Методические указания МУК 2.6.7.3652 -20 / Л.А.Чипига, А.В. Водоватов, Г.В. Беркович и соавт. – М., 2020. – С. – 34.

17. Беркович, Г.В. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии / П.С. Дружинина, Л.А.Чипига, Г.В.Беркович и соавт. // **Радиационная гигиена. – 2021. – №1. – С. 17-33.**

18. Беркович, Г.В. Результаты апробации комплексной экспертной оценки качества КТ-изображений органов грудной клетки, полученных на низкодозовых протоколах сканирования с применением методов итеративных реконструкций / Г.В.Беркович., Л.А. Чипига., А.В. Водоватов, Г.Е. Труфанов // **Лучевая диагностика и терапия. – 2021. – №3. – С. 94-111.**

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИИ – ионизирующее излучение

ИР – итеративные реконструкции

КТ – компьютерная томография

CNR – соотношение контраст-шум, contrast to noise ratio

FBP –метод фильтра обратных проекций, filtered back projection

IC – оценка соответствия критериям качества, image criteria

iDose – гибридные итеративные реконструкции, торговое название

IMR – модельные итеративные реконструкции, interactive model reconstruction

MTF – функции передачи модуляции, modulation transfer function

NPS – шумовой спектр, noise power spectrum

SNR – соотношение сигнал-шум, signal to noise ratio

VGA – оценка по внешним признакам, visual grading analysis