

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ МЕДИЦИНЫ»
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

НАУМОВА ДАРЬЯ ИГОРЕВНА

**ВОЗМОЖНОСТИ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ
В ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ**

3.1.25. Лучевая диагностика (медицинские науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
заслуженный деятель науки РФ,
доктор медицинских наук, профессор,
член-корреспондент РАН
Александр Юрьевич Васильев

Москва – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ПРИМЕНЕНИИ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРАКТИЧЕСКОМ ЗДРАВООХРАНЕНИИ	14
1.1. Современное состояние вопроса о проведении скринингового рентгенологического исследования органов грудной клетки.....	14
1.2. Возможности технологии двухэнергетической визуализации	20
на современном этапе развития лучевой диагностики	20
1.3. Двухэнергетическая рентгенография органов грудной клетки	24
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	37
2.1. Общая характеристика экспериментального материала	37
2.2. Общая характеристика клинического материала	38
2.3. Лучевые методы исследования	40
2.3.1. Цифровая рентгенография	41
2.3.2. Двухэнергетическая рентгенография	42
2.3.3. Мультисрезовая компьютерная томография	44
2.4. Методы статистической обработки полученных результатов.....	44
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..	46
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СКРИНИНГОВОГО РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ	50
4.1. Анализ стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИМТ	51
4.2. Анализ стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИКТ	55
4.3. Ограничения методики ДЭР	60
4.4. Исследование эффективной дозы облучения при ДЭР органов грудной клетки	62
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЦИЕНТОВ	64
С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ	64
5.1. Оценка эффективности применения ДЭР в сравнении с ЦР в диагностике заболеваний легких.....	65
5.2. Оценка эффективности применения ДЭР в сравнении с ЦР в диагностике патологии костных структур	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	88
ВЫВОДЫ	99
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ	100

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	101
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Проблема выявления заболеваний легких на доклинических стадиях остается до настоящего времени актуальной для мирового медицинского сообщества. По данным за 2022 г., болезни органов дыхания заняли лидирующую позицию в общей структуре заболеваемости населения Российской Федерации, что подчеркивает важность данного вопроса (Окладников С. М. и др., 2023). В контексте современной медицины и в рамках комплексного подхода к диагностике заболеваний легких, лучевые методы обследования продолжают играть ключевую роль. Согласно статистическим данным, в 2020 году в России было проведено свыше 70 миллионов профилактических рентгенологических исследований, причем 80% из них составляли цифровые флюорограммы и рентгенограммы органов грудной клетки (Тюрин И. Е., 2020). Невзирая на интенсивное внедрение низкодозной компьютерной томографии (НДКТ), рентгенография остается главной и наиболее доступной методикой для обнаружения легочной патологии на ранней стадии.

В научной литературе продолжают дискуссии относительно эффективности скрининговых программ с использованием рентгенографии в выявлении заболеваний легких (Маркелов Ю. М., Щеголева Л. В., 2023; Мастерова И. Ю. и др., 2018). Эффект суммации от органов и тканей исследуемой области затрудняет интерпретацию рентгенограмм и требует привлечения высококвалифицированных специалистов (Гаврилов П. В., Ушков А. Д., Смольникова У. А., 2019; Жуков Е. А. и др., 2020). Компьютерная томография, способная решить эту проблему, относится к дорогостоящим методам с высоким уровнем лучевой нагрузки (Bretthauer M. et al., 2023). Поэтому поиск новых рентгенологических методик для улучшения диагностического процесса остается актуальным.

С внедрением цифровых технологий удалось не только улучшить качество рентгенограмм, но и разработать новые способы получения и обработки изображений. В последнее десятилетие активно развивается перспективная

методика двухэнергетической рентгенографии (ДЭР), известная во всем мире как dual - energy subtraction radiography (DES) (Алексеева О. М., Булатов З. М., Касюк Д. М., 2020; Васильев А. Ю. и др., 2021; Boswell G. E. et al., 2023; Chou P. C., Karim K. S., 2023). Предполагается, что за счет разделения тканей различной плотности и уменьшения влияния суммационного эффекта двухэнергетическая рентгенография позволит повысить выявляемость различных заболеваний органов грудной клетки.

Степень разработанности темы

Несмотря на актуальность проблемы усовершенствования ранней диагностики заболеваний легких, научных работ по данной тематике представлено немного. В России ДЭР представляет интерес преимущественно для инженерно-технического научного сообщества. В немногочисленных работах рассматривается влияние физико-технических параметров на качество реконструированных изображений и предлагаются новые способы постпроцессорной обработки (Устинов А. О., Дабагов А. Р., 2018; Булатов З. В. и др., 2020; Шунков Ю. Е. и др., 2021).

Существенный вклад в изучение ДЭР внесли зарубежные авторы (K. Martini et al., 2017; Gezer M. C. et al., 2019; Mogami H. et al., 2021; Minato K. et al., 2023). В большинстве исследований оценивались возможности методики в выявлении легочных узелков, по результатам которых показатели диагностической эффективности превосходили результаты стандартной рентгенографии (Mogami H. et al., 2021; Minato K. et al., 2023; Gezer M. C. et al., 2019). Однако в мировой литературе отсутствуют данные о возможностях двухэнергетической рентгенографии в диагностике большинства нозологических форм легочной патологии. Недостаточно исследований, в которых рассмотрены возможности высокоэнергетического режима в оценке патологических изменений костных структур грудной клетки.

Перспективным направлением развития ДЭР, по данным многих авторов, является применение методики для оценки коронарного кальция (Song Y. et al., 2021; Boswell G. E., 2023). В настоящее время отдельные исследователи сообщают

об эффективности двухэнергетической рентгенографии, усиленной ксеноном, в выявлении функциональных нарушений на ранней стадии развития ХОБЛ (Basharat F. et al., 2020).

Учитывая немногочисленные данные, представленные в литературе, можно констатировать, что на сегодняшний день опыт применения ДЭР в практическом здравоохранении ограничен. Стоит отметить, что в имеющихся к настоящему времени данных мировой литературы, в целом подтверждающих эффективность применения ДЭР, остаются не затронуты важные аспекты для практического здравоохранения. В частности, это касается показаний к применению, физико-технических параметров съемки на двух энергиях при работе с отечественным рентгеновским оборудованием, методики исследования, а также основных ограничений, встречающихся в работе с данной технологией. Эти вопросы требуют более детального изучения и тщательной проработки.

Цель исследования

Улучшение лучевой диагностики заболеваний органов грудной клетки за счет применения методики двухэнергетической рентгенографии.

Задачи исследования

1. Провести экспериментальное исследование возможностей и ограничений двухэнергетической рентгенографии с использованием специально разработанного тест-объекта, с целью дальнейшего внедрения методики в клиническую практику, отработав физико-технические параметры съемки для рентгеновских аппаратов отечественного производства.
2. Оценить роль двухэнергетической рентгенографии в скрининговых исследованиях и её значимость в диагностическом процессе.
3. Выполнить сравнительный анализ эффективности двухэнергетической рентгенографии со стандартной методикой и мультисрезовой компьютерной томографии.

4. Определить место двухэнергетической рентгенографии в алгоритме лучевой диагностики болезней органов дыхания.

Научная новизна

1. Данная работа представляет первое научное исследование, целенаправленно посвященное диагностике различных заболеваний легких с использованием методики двухэнергетической рентгенографии.

2. Получен патент на тест-объект № RU204909 от 17.06.2021, по результатам исследования которого были выработаны оптимальные физико-технические условия съемки для рентгеновских аппаратов отечественного производства.

3. Впервые зарегистрированы базы данных № 2021621801 от 25.08.2021 и № 2024621640 от 15.04.2024, содержащие диагностические изображения, полученные с использованием двухэнергетической рентгенографии на первом этапе диагностического поиска и в процессе уточняющей диагностики.

4. Предложена схема последовательного анализа диагностических изображений, полученных в результате проведения двухэнергетической рентгенографии.

5. Выполнен комплексный анализ диагностической эффективности мягкотканного и костного режимов двухэнергетической рентгенографии по сравнению со стандартной методикой и мультисрезовой компьютерной томографией.

6. Определены показания и ограничения для использования двухэнергетической рентгенографии в клинической практике.

7. Определено место двухэнергетической рентгенографии в алгоритме диагностики болезней органов дыхания с последующим включением методики в схему.

Теоретическая и практическая значимость работы

В данной работе разработаны физико-технические параметры проведения ДЭР грудной клетки для рентгеновского оборудования отечественного производства. Определена практическая значимость ДЭР как на первом этапе диагностического поиска, так и в рамках уточняющей диагностики. Показаны преимущества использования ДЭР для диагностики различных заболеваний органов грудной клетки и костных структур указанной области по сравнению с традиционной методикой и компьютерной томографией. Также были выявлены ключевые ограничения, которые потенциально могут возникнуть при применении методики в широкой клинической практике, проанализированы их причины. Кроме того, было определено место ДЭР алгоритме диагностики болезней органов дыхания, что впоследствии позволит интегрировать данную методику в стандартные схемы обследования.

Методология и методы исследования

1. Поиск, изучение и систематизация отечественных и зарубежных источников по данной актуальной тематике.
2. Разработка и реализация тест-объекта, необходимого для изучения возможностей и ограничений ДЭР в разделении тканей различной плотности с последующей выработкой оптимальных физико-технических условий съемки.
3. Анализ результатов скринингового обследования пациентов.
4. Анализ результатов уточняющей диагностики пациентов. Сравнительное исследование диагностических возможностей ДЭР, стандартной рентгенографии и мультисрезовой компьютерной томографии.
5. Проведение статистической обработки данных и обобщение результатов исследования.

Для достижения целей исследования был проведен анализ обследования 302 пациентов.

Положения, выносимые на защиту

1. Двухэнергетическая рентгенография повышает диагностическую эффективность в выявлении заболеваний органов грудной клетки благодаря исследованиям в режимах «костного» и «мягкотканного» окна.
2. Разработанные физико-технические условия позволяют получать реконструированные изображения высокого качества, пригодные для практического использования.
3. Двухэнергетическая рентгенография в разных режимах (мягкотканного и костного) способствует дифференцировке патологических процессов в легочной ткани и костных структурах, что улучшает диагностику как на скрининговом, так и на стационарном этапах.
4. Выявлены возможности и ограничения двухэнергетической рентгенографии в исследовании органов дыхания.
5. Высокая диагностическая эффективность двухэнергетической рентгенографии позволяет рассмотреть её как замену традиционной методики.
6. Двухэнергетическая рентгенография не рассматривается как замена или альтернатива томографическим методикам. Тем не менее, в 38% случаев она обеспечивает дополнительную диагностическую информацию, что помогает уменьшить влияние эффекта суммации и увеличить выявляемость патологических процессов.

Связь работы с научными программами, планами

Диссертационная работа проводилась в рамках научно-исследовательской программы кафедры лучевой диагностики стоматологического факультета НОИ стоматологии им. А. И. Евдокимова ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России «Разработка и оптимизация современных лучевых диагностических технологий для решения задач клинической практики» (государственная регистрация № АААА-А20-120012890148-0).

Тема диссертационного исследования была утверждена и рекомендована к выполнению на заседании ученого совета НОИ стоматологии им. А. И. Евдокимова

ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (протокол №3 от 12.12.2023 г.).

Клинические исследования, являющиеся частью диссертационной работы, получили одобрение межвузовского этического комитета ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России (протокол № 11-23 от 16.11.2023).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Концепция, цели и задачи диссертационного исследования соответствуют паспорту научной специальности 3.1.25. Лучевая диагностика (медицинские науки). Полученные результаты интегрируются с ключевыми направлениями данной специальности в соответствии с пунктами 4, 5, 10, 11.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии на всех этапах исследования: создание тест-объекта для экспериментальных исследований, выполнение скрининговой рентгенографии и ее описание, набор и обработка материала, проведение анализа эффективности двухэнергетической рентгенографии в сравнении с мультисрезовой компьютерной томографией, апробация результатов работы на всероссийских и международных конференциях и конгрессах.

Автором совместно с научным руководителем был разработан и создан тест-объект (патент № RU 204909 от 17.06.2021). Автор самостоятельно выполнил анализ и обзор отечественной и зарубежной литературы по изучаемой проблеме. Автором лично обследовано 302 пациента и разработан алгоритм описания рентгенограмм, дополненных реконструированными изображениями. Автором проанализирован и статистически обработан материал, представленный в диссертационном исследовании.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность результатов исследования подтверждается достаточной выборкой пациентов ($n = 302$). Материалы полученных исследований верифицированы результатами лечения, другими диагностическими методами и динамическими контрольными исследованиями. Данные, полученные при проведении лучевого обследования больных, зарегистрированы в виде базы данных двухэнергетических рентгенограмм. Результаты диссертационного исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и входящих в базы публикаций Scopus. Материалы работы представлены в виде тезисов, устных и постерных докладов на международных и всероссийских конференциях и конгрессах. Анализ и интерпретация данных проводились с применением современных программ статистической обработки STATISTICA ver. 12 (StatSoft. Inc., USA) и StatTech v. 4.0.7 (разработчик – ООО «Статтех», Россия).

Апробация диссертации

Диссертационная работа апробирована на заседании кафедры лучевой диагностики стоматологического факультета научно-образовательного института стоматологии им. А. И. Евдокимова ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России 15 мая 2024 г. (протокол № 256 от 15.05.2024).

Обсуждение основных положений диссертации

Результаты данной работы были представлены и обсуждены на научно-практических конференциях, конкурсах молодых ученых и конгрессах:

1. «Лучевая диагностика – Смоленск 2020: конкурс молодых ученых» (онлайн-формат, 2020 г.);
2. Научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «VOLGAMEDSCIENCE» (Нижний Новгород, 2021 г.);
3. Студенческая научная конференция ФГБОУ ВО МГМСУ им. А. И. Евдокимова (Москва, 2021 г.);

4. Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов (Москва, 2022 г.);
5. Научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники (Санкт-Петербург, 2023 г.);
6. Конкурс ординаторов «Лучевая диагностика / Ядерная медицина» в рамках НРФ (Санкт-Петербург, 2023 г.);
7. Конгресс «Радиология-2024» (Москва, 2023 г.);
8. Научно-практическая конференция союзного государства «Лучевая диагностика – 2023: конкурс молодых ученых» (онлайн-формат, 2023 г.);
9. Научно-практическая конференция молодежного совета ГБУЗ «ГКОБ № 1 ДЗМ» (Москва, 2023 г.).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены: в учебный процесс на кафедре лучевой диагностики стоматологического факультета ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России на этапе дополнительного профессионального образования по специальности «рентгенология», кафедры лучевой диагностики ФУВ ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский институт им. М. Ф. Владимирского», на кафедре ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)» при подготовке курсов лекций для бакалавров по направлению подготовки «Электронные приборы и устройства», в учебный процесс ООО «Центральный научно-исследовательский институт лучевой диагностики» на этапе дополнительного профессионального образования.

В клиническую практику отделения лучевой диагностики ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский институт им. М. Ф. Владимирского», отделения лучевой диагностики КГБУЗ «Владивостокская поликлиника № 9» (подразделение 5), отделения лучевой диагностики ГБУЗ «Детская городская клиническая больница святого Владимира ДЗМ», в клиническую практику центра лучевой диагностики ФГБУ «Главный военный

клинический госпиталь имени академика Н. Н. Бурденко» Министерства обороны Российской Федерации, рентгеновских кабинетов кафедры и клиники рентгенологии и радиологии ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации.

Публикации по теме диссертации

Результаты диссертационной работы представлены в 16 публикациях. Из них 7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 1 публикация в базе данных Scopus.

Получен патент № RU 204909 U1 от 17.06.2021 на полезную модель «Тест-объект» для проведения рентгенологических обследований.

Получено свидетельство № 2021621801 от 25.08.2021 о государственной регистрации базы данных рентгенограмм по результатам скринингового обследования пациентов.

Получено свидетельство № 2024621640 от 15.04.2024 о государственной регистрации базы данных рентгенограмм и томограмм по результатам этапа уточняющей диагностики.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа включает в себя 119 страниц печатного текста, состоит из введения, 5 глав, заключения, выводов и практических рекомендаций. Список литературы включает 149 источников (58 отечественных и 91 иностранных). Работа оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.11-2011 и содержит 17 таблиц и 31 рисунок.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА О ПРИМЕНЕНИИ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРАКТИЧЕСКОМ ЗДРАВООХРАНЕНИИ

1.1. Современное состояние вопроса о проведении скринингового рентгенологического исследования органов грудной клетки

Ранее выявление заболеваний органов дыхания остается актуальной проблемой как для отечественного, так и мирового здравоохранения. По данным за 2022 г., в РФ в структуре общей заболеваемости населения на первом месте находятся болезни респираторной системы, удельный вес которых составляет 27 % [14].

На сегодняшний день стандартная рентгенография остается наиболее широко используемой методикой в выявлении легочной патологии на доклинической стадии. Так, по данным за 2020 г., в России было выполнено более 70 млн профилактических рентгенологических исследований, из которых 80 % приходилось на цифровые флюорограммы или рентгенограммы органов грудной клетки [49].

В настоящее время проведение популяционного рентгенологического скрининга с целью выявления легочной патологии регламентировано приказами Министерства здравоохранения РФ № 404н от 27 апреля 2021 г. «Об утверждении порядка проведения профилактического медицинского осмотра и диспансеризации определенных групп взрослого населения» и № 124н от 21 марта 2017 г. «Об утверждении порядка и сроков проведения профилактических медицинских осмотров граждан в целях выявления туберкулеза» [38; 39]. Так, согласно данным приказам, флюорография или рентгенография легких является обязательным исследованием для населения с 18 лет и выполняется не менее чем один раз в два года. Более того, при показателе общей заболеваемости туберкулезом в субъекте РФ 40 и более на 100 тыс. населения профилактическое рентгенологическое исследование проводится один раз в год. Также среди взрослого населения выделяют отдельные группы, которым показано выполнение проверочных

лучевых исследований два раза в год, вне зависимости от эпидемиологических показателей [38]:

- работники родильных домов (отделений, перинатальных центров);
- лица с ВИЧ-инфекцией;
- лица, снятые с диспансерного наблюдения в специализированных противотуберкулезных медицинских организациях в связи с выздоровлением от туберкулеза (в течение первых 3 лет после снятия с диспансерного наблюдения);
- лица, состоящие на диспансерном наблюдении (в том числе профилактическом наблюдении) в наркологических и психиатрических специализированных медицинских организациях;
- лица, освобожденные из мест отбывания наказания в виде лишения свободы, из мест содержания под стражей (в течение первых 2 лет после освобождения);
- подследственные, содержащиеся в местах отбывания наказания в виде лишения свободы, в местах содержания под стражей.

Дополнительно были выделены группы населения, которым профилактический осмотр проводится в индивидуальном (внеочередном) порядке [38]:

- лица, проживающие совместно с беременными женщинами и новорожденными;
- лица, у которых диагноз ВИЧ-инфекция установлен впервые;
- лица из окружения детей, имеющих измененную чувствительность к аллергенам туберкулезным, если с момента последнего обследования прошло более 6 месяцев;
- лица, в отношении которых имеются данные о наличии контакта с больным с заразной формой туберкулеза.

Впервые базовые принципы проведения скрининговых исследований были представлены ВОЗ (J. Wilson и G. Junger) в 1968 г., которые до настоящего времени

остаются золотым стандартом [144]. В 2008 г. данные критерии подверглись пересмотру, однако общие принципы остались неизменными [60]:

- заболевание должно представлять важную медико – социальную проблему;
- естественное течение болезни должно быть хорошо изучено;
- заболевание может быть выявлено на ранней стадии;
- наличие простых тестов (методов исследования) с научно доказанной диагностической эффективностью в выявлении заболеваний на доклинической стадии;
- риск вреда от используемого диагностического теста должен быть меньше, чем вероятность пользы;
- программа скрининга должна быть направлена на целевую популяцию (людей, имеющих наибольший риск развития определенного заболевания);
- доступность лечения в случае выявления заболевания;
- стоимость скрининговой программы должна быть оправдана ее пользой.

Согласно представленным критериям, к заболеваниям органов дыхания, в ранней диагностике которых особо значимая роль отведена рентгенологическим методикам обследования, относятся рак легкого и легочные формы туберкулеза [9; 48; 48].

За 2022 г. в РФ было зарегистрировано более 44 тыс. впервые выявленных случаев злокачественных опухолей трахеи, бронхов и легких. Из них 29,2% диагностированы на начальных стадиях (I–II), 27,9% - на стадии III и 42,2% - на стадии IV. Злокачественные новообразования дыхательной системы лидируют среди онкологических заболеваний у мужчин, составляя 16,4%. У женщин это заболевание встречается реже - 4,1% от общего числа онкологических заболеваний [16; 17].

До настоящего времени ведутся дискуссии относительно эффективности применения рентгенографии с целью ранней диагностики рака легкого. По результатам серии рандомизированных исследований, выполненных при поддержке National Cancer Institute USA (NCI), было определено, что применение рентгенографии грудной клетки в совокупности с цитологическим исследованием

мокроты, не способствует снижению смертности от рака легкого в изучаемой группе. Однако в работах представлено относительно небольшое количество наблюдений, и были включены только мужчины-курильщики без учета группы контроля [74; 78; 114].

В масштабном рандомизированном контролируемом исследовании Prostate, Lung, Colorectal and Ovarian (PLCO) Cancer Screening Trial ежегодно в течение трех лет проводилась рентгенография органов грудной клетки группе пациентов из 155 тыс. мужчин и женщин в возрасте от 55 до 74 лет. Важно отметить, что в работу включались добровольцы с неотягощенным онкологическим анамнезом, с наличием или отсутствием фактора риска в виде курения. В результате подозрительные изменения по данным рентгенографии были выявлены у 206 пациентов, из них у 126 был гистологически верифицирован рак легких. Несмотря на то что в 44 % случаев рак легкого был выявлен на I стадии, добиться снижения смертности посредством проведения рентгенологического скрининга в сравнении с контрольной группой не удалось [125].

Более того, ряд авторов отмечают, что наличие эффекта суммации от органов и тканей исследуемой области при выполнении стандартной рентгенографии грудной клетки приводит к высокому проценту ложноотрицательных и ложноположительных результатов [10; 12; 20]. До 30 % очаговых образований в легких вследствие их небольших размеров и низкой плотности пропускаются врачами-рентгенологами [11; 121].

В настоящее время в качестве метода раннего выявления злокачественных новообразований дыхательной системы все чаще применяется низкодозная компьютерная томография (НДКТ). По результатам крупных рандомизированных исследований NELSON (H. De Koning et al., 2018) и MILD (F. Sabia et al., 2019) внедрение в клиническую практику НДКТ привело к снижению смертности от рака легкого в группе пациентов высокого риска в 44 и в 39 % случаев соответственно [71, 126].

Однако в научной работе M. Bretthauer et al. (2023) было определено, что применение НДКТ на первом этапе диагностического поиска не способствует

увеличению продолжительности жизни в группе пациентов с раком легкого. Медиана наблюдения в указанном исследовании составила 10 лет [67].

Важно отметить, что средняя эффективная доза при НДКТ даже при использовании сверхнизкодозового протокола сканирования превышает показатели при стандартной рентгенографии и составляет от 0,5 до 2 мЗв [3; 72; 93; 63].

Также до настоящего времени в литературе отсутствуют данные об экономической эффективности и относительном вреде скрининговой программы с применением НДКТ [72].

В течение восьми лет до начала пандемии COVID-19 в РФ отмечалось улучшение эпидемической ситуации по туберкулезу. Согласно данным за 2019 г., показатель общей заболеваемости снизился на 7,2 % (с 44,4 до 41,2 на 100 000 населения) в сравнении с предыдущим годом, а с 2008 г. – на 51,6 % (85,1 на 100 000 населения) [40].

Нельзя не отметить разрушительное воздействие пандемии COVID-19 на проведение противотуберкулезных мероприятий. Согласно результатам исследования В. И. Стародубова и соавт. (2023), снижение общей заболеваемости туберкулезом в России во время пандемии COVID-19 произошло не вследствие улучшения эпидемической ситуации, а в результате воздействия ограничительных мер на сроки проведения скрининга, что привело к снижению охвата населения периодическими осмотрами. Так, заболеваемость туберкулезом, выявленная посмертно, в 2020 г. выросла в 1,2 раза и составила 0,88 на 100 000 населения (в 2019 г. – 0,75 на 100 000 населения). Кроме того, во время пандемии выросло количество пациентов с распространенными формами туберкулеза [46].

Бессимптомное течение туберкулеза и частое отсутствие специфических клинических проявлений, а также наличие атипичных симптомов у пациентов с сочетанной ВИЧ-инфекцией являются основными причинами необходимости проведения массовых профилактических мероприятий с включением в программу рентгенологических исследований легких [19; 23].

В исследовании Ю. М. Маркелова и Л. В. Щеголевой (2023) представлен анализ результатов массовых флюорографических осмотров в Республике Карелия за 13 лет. Согласно данным, проведение скрининговых рентгенологических исследований населения, не включающих группы высокого риска по туберкулезу, не способствует снижению одногодичной летальности впервые выявленных больных. Более того, в связи с улучшением эпидемиологической ситуации по туберкулезу за последние 10 лет отмечается и увеличение стоимости выявления одного случая заболевания почти в 4 раза [22].

В работе Н. А. Зубовой и соавт. (2016) также подчеркивается важность охвата групп высокого риска по туберкулезу при проведении скрининговых исследований. Согласно представленным данным в группе больных, выявленных по обращаемости в медицинские учреждения, тяжелые формы туберкулеза, представляющие эпидемическую опасность, встречались в 2 раза чаще, чем в группе, выявленных при массовых периодических осмотрах. Более того, результаты анализа показали, что формирование очагов инфекции наблюдалось преимущественно в местах проживания лиц с МБТ+ [15].

Актуальной проблемой скрининговых рентгенологических исследований является фактическое отсутствие единых стандартов их проведения. В исследовании В. А. Нечаева (2005) был предложен усовершенствованный алгоритм построения описания рентгенограмм органов грудной клетки. Предложенные меры позволили добиться повышения показателей диагностической эффективности рентгенографии в виде увеличения чувствительности на 7,9 %, специфичности на 7,2 % и точности на 7,5 % в выявлении рака легкого в течение полугода от начала заболевания и легочных форм туберкулеза [32].

Все вышеуказанные данные подтверждают несовершенство существующих скрининговых программ в ранней диагностике онкологических и неонкологических заболеваний органов грудной клетки с использованием массовых рентгенологических исследований. Данная проблема актуальна и требует поиска новых решений, позволяющих усовершенствовать процесс диагностики на доклинических стадиях.

1.2. Возможности технологии двухэнергетической визуализации на современном этапе развития лучевой диагностики

Технология двухэнергетической рентгеновской визуализации начала активно развиваться в 70-х гг. прошлого столетия [59; 106]. Однако такие технические ограничения, как низкое пространственное разрешение, выраженные артефакты, длительное время сканирования, недостаточная мощность рентгеновских трубок, долгое время исследования и высокий уровень лучевой нагрузки, препятствовали внедрению данной технологии в клиническую практику [58].

Научно-технический прогресс, произошедший за последние годы в области рентгеновской техники, поспособствовал возобновлению интереса к визуализации с энергетическим разрешением.

В настоящее время двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (ДРА) уже признана золотым стандартом в ранней диагностике остеопороза. Данная методика позволяет определить потерю минеральной плотности костной ткани (МПК) уже от 2–4 %, когда при стандартной рентгенографии признаки остеопороза выявляются при потере не менее 30 % костной массы [2; 104; 132].

В современных остеоденситометрах принцип сканирования реализован двумя способами. Первый предполагает использование фильтрующего слоя, который разделяет полиэнергетический пучок рентгеновского излучения на компоненты с низкой и высокой энергией. Второй способ основан на быстром переключении напряжения на рентгеновской трубке. Применение двух энергий фотонов позволяет эффективно дифференцировать ткани с разными коэффициентами ослабления с дальнейшим вычислением проекционной плотности костной ткани. При выполнении ДРА МПК определяется как значение плотности, измеряемой в граммах на квадратный сантиметр. Двухэнергетическая методика позволяет оценить структурные особенности костной ткани, сравнить индивидуальные показатели МПК с референсной базой данных, представив результаты в формате T- и Z-критериев. Важным преимуществом

двухэнергетической методики является малая величина дозовой нагрузки, которая составляет 5–20 мкЗв [33; 111].

На сегодняшний день все больше становится популярной методика контрастной спектральной двухэнергетической маммографии (КСДМ) в диагностике заболеваний молочных желез. Данная технология заключается в получении маммограмм, выполненных при высоком и низком анодном напряжении, и построении на их основе субтракционных изображений. Таким образом, КСДМ позволяет дополнить данные полноформатной цифровой маммографии функциональными характеристиками в виде определения фонового контрастирования тканей молочной железы [50; 54; 55].

В мировой литературе уже представлено немало работ, посвященных сравнению диагностической эффективности КСДМ и цифровой маммографии [34; 53; 69; 76].

Одно из первых клинических исследований по данной тематике было выполнено J. M. Lewin et al. (2003). В работе оценивалась степень контрастирования образований молочных желез у 26 женщин. При анализе полученных данных было выявлено, что в 11 случаях инвазивного рака молочной железы определялось выраженное накопление контрастного препарата, в 1 – умеренное, а в 2 – слабое, при этом у 12 пациентов с доброкачественными образованиями в 2 случаях также определялось слабое накопление контрастного препарата [106].

В научной работе Е. А. Оксанчук (2017) оценивалась эффективность КСДМ в диагностике образований молочной железы с высокой плотностью тканей в сравнении с традиционной методикой и МРТ. Согласно результатам данного исследования, чувствительность, специфичность и точность КСДМ превышает показатели стандартной маммографии. Диагностическая эффективность изучаемой методики оказалась сравнимой с МРТ, что позволило рекомендовать КСДМ в качестве метода выбора для диагностики заболеваний молочной железы ввиду большей доступности [34].

В исследовании Р. Х. Ульяновой (2022) показано, что применение двухэнергетической методики в диагностике злокачественных и доброкачественных образований молочных желез позволило добиться статистически значимого повышения показателей чувствительности – 91,6 % против 85,7 %, специфичности – 93,3 % против 87,3 %, точности – 94,5 % против 86,8 % при сравнении с цифровой маммографией. Также было выявлено, что точность КСДМ превосходит точность цифровой маммографии у пациенток с высокой плотностью молочной железы (С и D типы по классификации BI-RADS, 2014). Важно отметить, что дополнительная информация, полученная после выполнения КСДМ, привела к изменению объема хирургического вмешательства в 37 % случаев [50].

Более того, в ряде научных работ отмечается, что «мягкие» реконструированные изображения, полученные при КСДМ, не уступают по характеристикам стандартным маммограммам, что позволяет говорить об отсутствии необходимости в дополнительном проведении маммографии после проведения КСДМ [80; 103].

Одним из основных ограничений двухэнергетической методики является величина лучевой нагрузки. По данным различных авторов, диапазон поглощенной дозы облучения составил от 2,19 до 7,15 мГр, что почти в 3 раза превышает дозу при цифровой маммографии [66; 90]. Тем не менее данные значения остаются ниже порога, указанного в европейских рекомендациях по обеспечению качества скрининга рака молочной железы [128].

Другой методикой с энергетическим разрешением является двухэнергетическая компьютерная томография (ДЭКТ). Применение данной технологии в клинической практике стало доступным с 2006 г., что связано с появлением первых специализированных томографов [18, 41]. Научно-технический прогресс, произошедший за последнее десятилетие в области рентгеновской техники, позволил реализовать несколько способов проведения сканирования при двух разных уровнях анодного напряжения: с двумя

рентгеновскими трубками, с одним источником излучения за счет быстрого переключения напряжения и с двуслойным детектором [41; 78; 136; 136].

Далее на этапе постобработки создаются «уникальные» изображения, позволяющие получить дополнительную информацию об исследуемых структурах. На сегодняшний день в клинической практике наиболее часто прибегают к созданию виртуальных моноэнергетических и неконтрастных изображений из постконтрастных серий, изображений разделения материалов, а также изображений распределения эффективного атомного номера [41; 79].

Низкоэнергетические виртуальные изображения (40–80 кэВ) позволяют за счет повышения контрастного разрешения визуализировать образования малого диаметра (до 5 мм) различной локализации, которые слабо дифференцируются на фоне окружающих тканей [18; 37; 41]. Высокоэнергетические виртуальные изображения (95–140 кэВ) преимущественно применяются с целью устранения артефактов от металлоконструкций [138].

Изображения разделения материалов в настоящее время создаются преимущественно для построения карт распределения йода, что значительно повышает точность оценки накопления контрастного вещества и повышает качество диагностики [127].

В работе D. Muenzel et al. (2017) было определено, что применение йодных карт позволяет повысить выявляемость гиперваскулярных образований печени в сравнении с низкоэнергетическими виртуальными изображениями. Более того, информативность йодных карт при ДЭКТ оказалась сопоставимой с МРТ в дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных образований печени [121].

Еще одной опцией ДЭКТ является возможность создания виртуальных неконтрастных изображений из постконтрастных серий, что позволяет значительно сократить дозовую нагрузку на пациента, отказавшись от проведения нативного исследования [141].

Изображения в настоящее время преимущественно используются в урологии для оценки мочевых камней. Так, в ряде исследований ученым удалось доказать,

что точность определения состава камней вдвое выше при ДЭКТ, чем при оценке единиц Хаунсфилда по данным стандартной компьютерной томографии [45; 122].

Одним из ограничений применения ДЭКТ является потенциальное увеличение дозовой нагрузки. По данным разных авторов, средняя доза при проведении ДЭКТ органов брюшной полости варьирует от 13 до 17,5 мГр [136; 122]. Более того, существует предположение, что величина дозовой нагрузки варьирует в зависимости от технологии сканирования; так, томографы с функцией быстрого переключения на рентгеновской трубке дают более низкую дозу облучения в сравнении с двуслойным детектором [136]. В среднем поглощенная доза излучения при проведении ДЭКТ органов брюшной полости на 20 % выше дозы, полученной при стандартной методике указанной области, тем не менее данный показатель не превышает допустимые значения, рекомендованные Американским радиологическим колледжем (КТ-индекс дозы не выше 25 мГр).

1.3. Двухэнергетическая рентгенография органов грудной клетки

«Двухэнергетическая рентгенография (ДЭР) – это рентгенологическая методика исследования, позволяющая последовательно получить две рентгенограммы, выполненные при высоком и низком анодных напряжениях и построении на их основе реконструированных изображений тканей, имеющие разные коэффициенты ослабления» [56; 1].

На сегодняшний день существует несколько вариантов выполнения ДЭР: двухимпульсная, при которой две последовательные экспозиции с высоким и низким анодным напряжением дают отдельные изображения мягких и костной тканей, и одноимпульсная, способная получить исходные изображения одновременно благодаря использованию двуслойного детектора. Однако в современных рентгеновских аппаратах преимущественно используется двухимпульсная последовательность в связи с тем, что данная технология обеспечивает более высокую контрастность при меньшей дозе излучения [21; 52].

В медицинской рентгеновской технике для рутинных исследований применяется анодное напряжение от 40 до 150 кВ, при ДЭР используются

диапазоны 50 и 70 кВ для получения мягкотканых изображений и 120 и 140 кВ – для костных изображений [1; 52].

ДЭР преимущественно предназначена для исследования органов грудной клетки, что прежде всего связано с анатомическими особенностями указанной области, затрудняющими диагностику в виде наличия суперпозиции легочной паренхимы и костных структур [6; 52].

На текущий момент в РФ несколько производителей аппаратов с технологией ДЭР, к которым относятся АО «МТЛ» (Россия), Fujifilm Medical System (Япония), Shimadzu (Япония), GE Healthcare (США) [52]. Несмотря на то что данная технология уже присутствует в функционале многих рентгеновских аппаратов, ДЭР пока не нашла свое место в алгоритме лучевого обследования органов грудной клетки и представляет преимущественно интерес для технического научного сообщества.

Первые экспериментальные исследования, посвященные ДЭР, появились в начале 1980-х гг. [68; 91;98]. В работе R. A. Kruger et al. (1981) на примере тест-объекта из органического стекла, включающего в себя набор из 10 дисков диаметром 12 мм с разной концентрацией гидроортофосфата кальция от 50–500 мг/см², доказали, что аналоговая ДЭР позволяет четко визуализировать очаги с концентрацией кальция от 100 мг/см² [98].

Впоследствии R. A. Kruger совместно с J. T. Но (1989) провели сравнительный анализ эффективности ДЭР (одноимпульсной и двухимпульсной) и стандартной рентгенографии в выявлении очагов на примере антропометрического фантома грудной клетки. В качестве имитации очаговых образований применялись полиэтиленовые сферы диаметром до 8 мм, которые в различных комбинациях располагались в фантоме. Наиболее эффективной оказалась двухимпульсная ДЭР (AUC 0,94) в сравнении с одноимпульсной ДЭР (AUC 0,93) ($p > 0,05$) и стандартной рентгенографией (AUC 0,89) ($p < 0,05$) [88].

В начале 1990-х гг. проведены первые клинические исследования, в которых оценивались возможности методики в визуализации легочных узелков [94; 95]. Выявление очаговых изменений в легких по данным стандартной рентгенографии

является одной из самых сложных задач торакальной радиологии. В ранее опубликованных работах говорилось, что очаговые образования размерами до 10 мм зачастую невозможно определить на рентгенограммах [94; 95]. В первую очередь это связано с искажением визуальной информации на двумерных плоскостных изображениях, обусловленной суммацией анатомических структур исследуемой области [13; 133].

В работе F. Kelcz et al. (1994) было обследовано 200 пациентов, у которых по данным КТ выявлены 116 образований средним диаметром 10 мм. В интерпретации полученных изображений принимали участие 5 врачей-рентгенологов. В результате ДЭР позволила выявить 66 образований, из которых 10 кальцинированные. При анализе AFROC-кривых площадь под кривой для ДЭР составила 0,7, а для стандартной рентгенографии 0,6 ($p < 0,05$). Таким образом, ДЭР позволила улучшить выявляемость очагов в легочной паренхиме [94].

В исследовании T. Ishigaki et al. (1988) впервые оценивались показатели диагностической эффективности ДЭР в диагностике очаговых изменений в легких, при этом дополнительно продемонстрированы возможности костного режима. Авторы обследовали 140 пациентов, у которых по данным стандартной рентгенографии были обнаружены 142 образования (в 108 случаях изменения соответствовали периферическому раку, в 34 – метастатическому поражению) и 23 изменения в структуре ребер (в 4 случаях переломы, в 2 – врожденные аномалии развития, в 17 – костные метастазы). В качестве референтного метода выступала КТ. При анализе основных показателей диагностической эффективности чувствительность ДЭР в выявлении образований в легких составила 72 % против 47 %, специфичность 86 % против 74 % в сравнении с традиционной методикой. Также применение ДЭР позволило усовершенствовать визуализацию патологических изменений в структуре ребер (чувствительность 68 % против 20 % и специфичность 92 % против 85 %). Как отмечают авторы, новая методика позволила дополнить информацию, полученную при анализе стандартных рентгенограмм, в 27 % случаев [91].

Тем не менее, несмотря на высокий диагностический потенциал ДЭР, широкое применение методики в клинической практике долгое время было ограничено, что в первую очередь связано с плохим качеством реконструированных изображений с выраженными артефактами при достаточно высоком уровне лучевой нагрузки [100].

Переход на цифровые рентгенологические системы, создание плоскопанельных детекторов нового поколения и совершенствование алгоритмов обработки изображений позволили устранить ранее существующие недостатки методики, препятствующие ее внедрению в клиническую практику [52].

Важно отметить, что с развитием новых технологий значительно сокращалась дозовая нагрузка при проведении ДЭР. На сегодняшний день, по данным разных авторов, общая эффективная доза при ДЭР в 1,5–2 раза превышает значения дозы при выполнении стандартной рентгенографии в одной проекции [84; 113]. Так, доза облучения, полученная в ходе традиционного рентгенологического исследования органов грудной клетки в оптимальных условиях, составляет 0,01 мЗв, при выполнении методики с энергетическим разрешением средняя эффективная доза – 0,02 мЗв, что соответствует одной сотой природной годовой лучевой нагрузке [93; 116; 133]. Указанные значения являются допустимыми согласно нормативам СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» [42].

По данным мировой литературы, добиться большего снижения величины дозовой нагрузки возможно при изменении физико-технических параметров реконструкции и экспозиции [52; 81; 93; 97]. Так, С. Kim et al. при фиксированной паре напряжений 80/130 кВ в сочетании с фильтром 2 мм Cu + 0,7 мм Sn достигли значения общей дозы во входной плоскости приемника 0,1 мГр, что сопоставимо с показателями при выполнении стандартной рентгенографии [97].

С появлением такой новой технологии, как цифровая ДЭР, интерес к ней непреклонно возрастает. За последние 10 лет, по данным Национальной библиотеки медицины США, отмечается рост количества опубликованных

научных работ, относящихся к указанной тематике (за 2013 г. – 18 публикаций, за 2022 г. – 65 публикаций).

Как уже упоминалось ранее, создание цифровых плоскопанельных детекторов и развитие различных алгоритмов постпроцессорной обработки позволили предложить новые способы визуализации, позволяющие минимизировать отрицательное воздействие суммационного эффекта, к которому относится цифровой томосинтез (ТС). ТС – методика лучевой диагностики, позволяющая за один проход рентгеновской трубки получить серию изображений различных слоев исследуемой области [30; 31; 52]. Однако данная методика относится к томографическим и сопровождается значительно большей дозой нагрузки, по данным разных авторов – от 0,05 до 0,92 мЗв, при сравнении с ДЭР [87; 98; 115; 148].

В настоящее время в мировой литературе присутствует ряд работ, посвященных сравнительной оценке цифровой ДЭР в выявлении очаговых изменений легких с другими методиками (стандартная рентгенография и ТС) [8; 100; 101; 107; 110; 112; 118; 124].

В исследовании S. Kumar et al. (2015) оценивались диагностическая эффективность ДЭР и цифровой рентгенографии (ЦР) в выявлении очаговых образований. В качестве референтного метода выступала мультисрезовая компьютерная томография (МСКТ). В результате было выявлено 110 солидных очагов размерами от 4 до 9 мм. Два врача-рентгенолога с опытом работы более 15 лет в области торакальной радиологии интерпретировали полученные изображения. При анализе полученных данных оказалось, что чувствительность ДЭР в выявлении очагов в группе от 7–9 мм значительно превосходила чувствительность стандартной рентгенографии и составляла 62,5 % против 54,2 %. Показатели диагностической эффективности в выявлении более мелких очаговых образований были низкими для обеих методик (26,9 % против 23,1 %). Чувствительность ТС значительно превышала показатели нетомографических методик во всех группах (для очагов от 7–9 мм составляла 95,8 %, а для меньших размеров – 73,1 %). Одним из главных ограничений данного исследования было то,

что преобладающее количество очаговых образований (42 %) относились к размерной группе от 4–5 мм [101].

В 2021 г. Н. Mogami et al. провели крупное исследование, в котором оценивались возможности ДЭР в выявлении рака легкого на доклинической стадии. В работе приняли участие более 13 тыс. добровольцев в возрасте от 50 лет, которые за полтора года до исследования проходили скрининговое обследование. Важно отметить, что среди добровольцев были люди как с наличием в анамнезе курения, так и некурящие. Применение ДЭР позволило повысить процент выявляемости рака легкого от 16 (0,12 %) до 23 (0,17 %) при сравнении со стандартной методикой, выполненной в двух проекциях. При этом в 5 случаях рак легкого был выявлен на ранней стадии. Главным ограничением данного исследования было то, что интерпретацию полученных изображений проводил один врач-рентгенолог [118].

В работе F. Li et al. проводили обследование 35 добровольцев, из которых у 19 человек, по данным стандартной рентгенографии, был пропущен периферический рак легкого. В интерпретации реконструированных изображений приняли участие 6 врачей-рентгенологов. При анализе ROC-кривых отмечалось, что применение ДЭР позволило добиться статистически значимого увеличения AUC (0,82 против 0,72), а также повышения показателя чувствительности (59 % против 40 %) [107].

В исследовании F. Manji et al. дополнительно проводился сравнительный анализ времени, затраченного на интерпретацию реконструированных и стандартных изображений как в группе опытных врачей-рентгенологов, так и среди ординаторов. По данным рентгенологического обследования 51 пациента, у 34 были выявлены очаговые изменения, 17 пациентов были распределены в группу контроля. В работе приняли участие 5 врачей-рентгенологов и 5 ординаторов. В результате были достигнуты статистически значимые различия в показателях чувствительности ДЭР и стандартной рентгенографии в выявлении очаговых образований – 64–71 % и 57–59 % соответственно. Время интерпретации изображений в группе врачей-рентгенологов составило 15 секунд для оценки

реконструированных изображений и 21 секунду для стандартных рентгенограмм, в группе ординаторов 10 и 13 секунд соответственно ($p < 0,05$). Таким образом, применение ДЭР позволяет более уверенно и быстрее принимать решение по поводу заключения вне зависимости от опыта работы [112].

Minato K. et al. в своей работе оценивали возможности ДЭР в разделении кальцинированных и некальцинированных очагов в легком. Важно отметить, что плотные кальцинированные очаговые образования относятся к группе низкого риска злокачественности, однако и они требуют динамического наблюдения [12]. Проводилось обследование 139 пациентов, у которых ранее было выявлено 155 солидных и частично солидных очагов (48 кальцинированные и 107 без признаков кальцификации) средним диаметром 8 мм. Применение ДЭР позволило статистически значимо повысить точность в дифференциальной диагностике кальцинированных очагов у врачей-рентгенологов с меньшим опытом работы. Также уменьшилось количество пропусков очаговых образований, расположенных за тенью ребер и ключиц, в сравнении со стандартной рентгенографией [118].

Одним из первых и значимых исследований, в котором рассматривалась роль ДЭР в оценке патологических изменений при различных заболеваниях дыхательной системы, является работа К. Martini et al. (2017). Авторы обследовали 199 пациентов, которым на первом этапе выполнялась стандартная рентгенография в двух проекциях и ДЭР в прямой проекции, а на втором этапе в течение 72 часов проводилась МСКТ. Оценка изображений выполнялась двумя врачами-рентгенологами. В результате коэффициент согласия между экспертами был выше при анализе реконструированных изображений ($k_{DES} = 0,93$), чем при стандартной рентгенографии ($k_{CR} = 0,86$). Применение ДЭР позволило добиться статистически значимого повышения показателя чувствительности при оценке инфильтративных (62 % против 42 %), очаговых (57 % против 46 %), интерстициальных изменений (87 % против 69 %) и кальцинатов стенки аорты и трахеи (73 % против 25 %). Двухэнергетическая методика не показала значимых различий в сравнении с традиционной методикой при определении пневмоторакса, гидроторакса, плевральных утолщений [113].

Однако уже 2018 г. в работе А. Urbaneja была оценена диагностическая эффективность ДЭР в выявлении пневмоторакса в сравнении со стандартной методикой. Авторы провели обследование 40 пациентов, по результатам которого у 19 человек был выявлен пневмоторакс. Объем пневмоторакса рассчитывался по методу Choi/Rhea, согласно которому при объеме воздуха в плевральной полости менее 20 % пневмоторакс считался малым, а при значениях более 20 % – большим [140]. В интерпретации полученных изображений принимали участие 5 студентов, 16 ординаторов (среди которых 9 рентгенологов, 2 пульмонолога и 5 терапевтов) и 15 опытных врачей (4 рентгенолога и 11 врачей скорой помощи). Исследование проводилось в 3 этапа: на первом этапе выполнялась интерпретация стандартных рентгенограмм, на втором – только отдельного изображения мягких тканей (РИМТ) и на третьем – стандартной рентгенограммы, дополненной реконструированными изображениями. В результате количество верных ответов возросло на 13,3 % при сравнении 1-го и 2-го этапов ($p < 0,01$) и на 9,4 % при сравнении 1-го и 3-го ($p < 0,01$). Наиболее высокий показатель чувствительности был получен при анализе результатов 2-го этапа (82 %), когда на 3-м этапе этот показатель составил 79 % и на 1-м этапе – 70 %. Важно отметить, что наибольшее количество верных ответов при определении малого пневмоторакса было получено после интерпретации реконструированных изображений. Таким образом, ДЭР позволяет более эффективно диагностировать пневмоторакс [142].

Впервые в исследовании М. Gezer et al. (2019) по отдельности оценивалась роль РИМТ и отдельных изображений костной ткани (РИКТ) в выявлении основных патологических изменений органов грудной клетки в сравнении с традиционной методикой, выполненной в двух проекциях. На примере данных рентгенологического обследования 96 пациентов было доказано, что выполнение мягкотканной реконструкции позволяет более эффективно выявлять очаговые и интерстициальные изменения, в свою очередь, костная реконструкция улучшила визуализацию переломов ребер и ключиц. При этом отмечалось значимое увеличение коэффициента согласия между двумя врачами-рентгенологами при оценке ДЭР. Одним из основных ограничений данного исследования было

небольшое количество пациентов с паталогическими изменениями органов грудной клетки [84].

Mueller et al. в работе оценивали возможности ДЭР и стандартной рентгенографии в диагностике эмфиземы легких. В качестве референтного метода использовалась МСКТ. В исследовании приняли участие 66 пациентов. В результате коэффициент согласия между двумя экспертами был выше при оценке стандартных изображений ($k_{CR} = 0,61$), чем при отдельных ($k_{DES} = 0,43$). Чувствительность также оказалась выше при стандартной рентгенографии (96 % против 91 %), при этом отмечалось снижение показателя специфичности (75 % против 83 %), однако в обоих случаях различия не были статистически значимыми. Корреляция с референтным методом была выше у ДЭР ($r_{DES} = 0,75$), чем при традиционной методике ($r_{CR} = 0,68$) ($p > 0,05$). Таким образом, эффективность стандартной рентгенографии и методики с энергетическим разрешением сопоставимы в диагностике эмфиземы легких [119].

С целью улучшения визуализации эмфизематозных изменений у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ) канадскими учеными была предложена ДЭР, усиленная ксеноном, позволяющая дополнять данные полноформатной цифровой рентгенографии функциональными характеристиками. В экспериментальном исследовании F. Basharat и соавт. было выявлено, что модифицированная ДЭР способна диагностировать функциональные нарушения даже на начальных стадиях болезни, что в дальнейшем позволит использовать данную методику в качестве низкодозной и недорогой альтернативы КТ после детального изучения [62].

В исследовании V. Obmann et al. (2017) рассматривались возможности ДЭР в оценке патологических изменений легких у взрослых пациентов с муковисцидозом в сравнении со стандартной рентгенографией. Ретроспективно анализировались данные 24 человек, у которых был диагностирован муковисцидоз в стадии обострения. Интерпретация изображений выполнялась двумя врачами-рентгенологами с опытом работы в области торакальной радиологии от 4 лет. Выявленные изменения в легких по данным рентгенологического исследования

оценивались по модифицированным критериям Криспина-Нормана (CNS), согласно которым каждому паттерну (повышение прозрачности легких, линейные затемнения, кольцевидные тени, пятнистые тени) присуждался балл от 0 (не выявлены) до 2 (четко определяются). В результате были достигнуты статистически значимые различия по сумме баллов CNS при сравнительной оценке ДЭР и стандартной рентгенографии ($p < 0,05$) [123].

В 2015 г. Y. Gao et al. представили клинический случай, в котором описывается возможность костного режима ДЭР в оценке миграции центрального венозного катетера. Важно отметить, что изменения не были выявлены по данным стандартной рентгенографии. Таким образом, описанный клинический случай позволяет судить о потенциале ДЭР в оценке установки медицинских изделий (центральные венозные катетеры, инфузионные порт-системы, трахеостомические трубки и т. д.) [82].

В 2023 г. P. C. Chou и K. S. Karim продемонстрировали возможности мягкотканного режима ДЭР в выявлении образований легких, локализованных за тенью инородных тел, например электрокардиостимулятора (ЭКС) [70].

На сегодняшний день в мировой литературе представлен ряд работ, посвященных оценке ДЭР в выявлении патологических изменений при сердечно-сосудистых заболеваниях [61; 137; 143; 148].

В экспериментальном исследовании B. Zhou et al. на примере цифровых 3D-фантомах органов грудной клетки при проведении ДЭР был впервые применен алгоритм постпроцессорной обработки, который позволил полностью визуализировать кальцинированные коронарные артерии [148].

В клиническом исследовании Y. Song et al. (2021) оценивались способность врачей обнаруживать коронарные кальцинаты на двухэнергетических рентгенограммах, обработанных ранее усовершенствованным алгоритмом постпроцессорной обработки CorCalDx-viz. Обследовано 65 добровольцев, у которых по результатам МСКТ были определены кальцинированные коронарные артерии. Далее было отобрано 130 образцов с последующей оценкой индекса Агастона. Важно отметить, что превалирующее количество анализируемых

участков кальцификации ($n = 72$) имели индекс Агастона от 0 до 50, что трактуется как незначительная кальцификация. В результате при анализе ROC-кривых площадь под кривой (AUC) при применении модифицированной двухэнергетической методики составила 0,85 для порогового значения индекса Агастона 300 и 0,78 для значения 100. В качестве сравнения: для маммографии данные значения находятся в диапазоне от 0,7 до 0,83 [64; 83]. Таким образом, модифицированная ДЭР может рассматриваться в качестве метода скрининга ишемической болезни сердца [137].

В обзорной статье G. Boswell et al. (2022) впервые была представлена методология выполнения ДЭР органов грудной клетки в боковой проекции для оценки коронарного кальция. Средняя эффективная доза при выполнении ДЭР в прямой и боковой проекциях превышала дозу при стандартной рентгенографии в двух проекциях в 2,3 раза, при этом значения дозы были допустимыми и находились в диапазоне от 0,06 до 0,15 мЗв [65].

Важно отметить, что на сегодняшний день в мировой литературе представлены единичные публикации, посвященные возможностям высокоэнергетического режима ДЭР в изолированной оценке костных структур грудной клетки. В ранее рассмотренных работах сравнение костного режима ДЭР с традиционной методикой проводилось в рамках общего рентгенологического исследования органов грудной клетки, по данным которого выявленные патологические изменения костей скелета грудной клетки были случайными находками и в большинстве случаев никак не верифицировались [84; 113]. В исследовании Z. Szucs-Farkas et al. была попытка оценить роль ДЭР в визуализации переломов ребер. В работе приняли участие 39 пациентов, у которых были выявлены 204 перелома ребер при МСКТ. Реконструированные изображения, полученные в данном исследовании, были субоптимального качества, с выраженными артефактами в виде зернистости, что, вероятно, связано с использованием в работе одноимпульсной ДЭР. В связи с этим статистически значимых различий ДЭР и традиционной методики в выявлении повреждений ребер не было достигнуто [139].

Улучшение качества двухэнергетических рентгенограмм посредством усовершенствования алгоритма обработки изображений рассматривалось в работах российских и зарубежных авторов [35; 57; 81; 104; 134].

В исследовании Ю. В. Шункова и соавт. (2021) были предложены меры, позволяющие уменьшить артефакты движения на реконструированных изображениях. С целью сокращения временного интервала между экспозициями высокое анодное напряжение подавалась с задержкой в первом окне детектора. Далее производилось алгоритмическое совмещение исходных изображений, которое выполнялось перед расчетом реконструированных изображений, что в результате позволило значительно уменьшить количество визуализированных артефактов от сердечных сокращений, дыхательных движений, пульсирующих сосудов [57; 134].

Проблема высокого уровня шума на реконструированных цифровых изображениях при выполнении ДЭР остается актуальной до настоящего времени. Наиболее эффективным и простым способом шумоподавления является увеличение тока, подаваемого на рентгеновскую трубку, однако такой вариант решения проблемы не может рассматриваться в рамках медицинской визуализации в связи с выраженным увеличением уровня лучевой нагрузки [75; 104]. Ранее с целью уменьшения выраженности «зернистости» были предложены следующие алгоритмы: простое сглаживание высокоэнергетических изображений (simple smoothing of high-energy images, SSH) (1985), антикоррелированное шумоподавление (anti-correlated noise reduction, ACNR) (1988) и общий алгоритм линейного шумоподавления (general linear noise reduction, GLNR) (2008) [130]. Однако количественная и сравнительная оценка представленных методов в клинической практике не производилась [129].

В исследовании M. Lee et al. (2020) был предложен нелинейный алгоритм ДЭР, который в экспериментальном исследовании с использованием антропометрического фантома грудной клетки позволил значительно улучшить качество реконструированных изображений за счет подавления квантового шума и

более эффективного «разделения» тканей с различными коэффициентами линейного ослабления [104].

Одним из потенциальных способов решения проблем, связанных с артефактами движения, повышенной дозой облучения при двойной экспозиции, отсутствием необходимой аппаратуры, является инструмент декомпозиции, который позволяет «разделить» костные и мягкотканые структуры из исходного изображения виртуально с помощью нейронных сетей [73; 108; 109; 145; 146]. В настоящий момент данная технология находится на этапе разработки и требует дальнейшего изучения с большим количеством данных.

Подводя итог, отметим, что ДЭР оказалась ценной «методикой лучевого исследования в диагностике заболеваний органов грудной клетки, позволяющая дополнить данные полноформатной цифровой рентгенографии при сопоставимой дозовой нагрузке» [27]. Однако в ранее опубликованных работах не были затронуты такие важные аспекты для практического здравоохранения, как показания к применению, технология проведения исследования, основные ограничения, встречающиеся в работе с данной методикой, а также методология протоколирования результатов, которые требуют детального изучения.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научное исследование состояло из экспериментального и клинического этапов.

Клиническая часть работы выполнялась в два этапа.

На первом проводились скрининговое обследование пациентов с использованием ДЭР и цифровой рентгенографии и сравнительный анализ полученных данных (n = 252).

На втором этапе пациентам с выявленной патологией органов грудной клетки выполнялись дообследование с применением МСКТ и сравнительный анализ полученных результатов (n = 50).

2.1. Общая характеристика экспериментального материала

Для оценки возможностей ДЭР был создан тест-объект (патент № RU 204909 С1 от 17.06.2021) [36].

ДЭР была проведена на тест-объекте, включающем в себя следующие анатомические структуры: семь шейных древних позвонков, соединенных между собой силиконовыми дисками; пластиковые структуры: трахеобронхиальное дерево, позвоночные артерии с участками кальцификации из синтетического костно-пластического материала. В состав структуры правой позвоночной артерии входила пролонгированная атеросклеротическая бляшка с сужением просвета сосуда менее чем на 25 %. Левая позвоночная артерия включала в себя две локальные атеросклеротические бляшки, расположенные на разных уровнях, с сужением просвета сосуда на 50 и 75 %.

Для визуализации структур тест-объекта различной плотности на разных энергиях исследование выполнялось на рентгеновском аппарате «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия) и на цифровой системе «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония).

2.2. Общая характеристика клинического материала

Первый этап – скрининговое исследование, на котором были представлены материалы обследования 252 пациентов: мужчин – 133 человек (52,7 %), женщин – 119 человек (47,3 %) (Рисунок 1). Возрастной диапазон исследуемой группы от 18 до 90 лет (средний возраст 60 лет). Наибольшее количество обследованных больных находились в возрастных пределах от 60 до 69 лет.

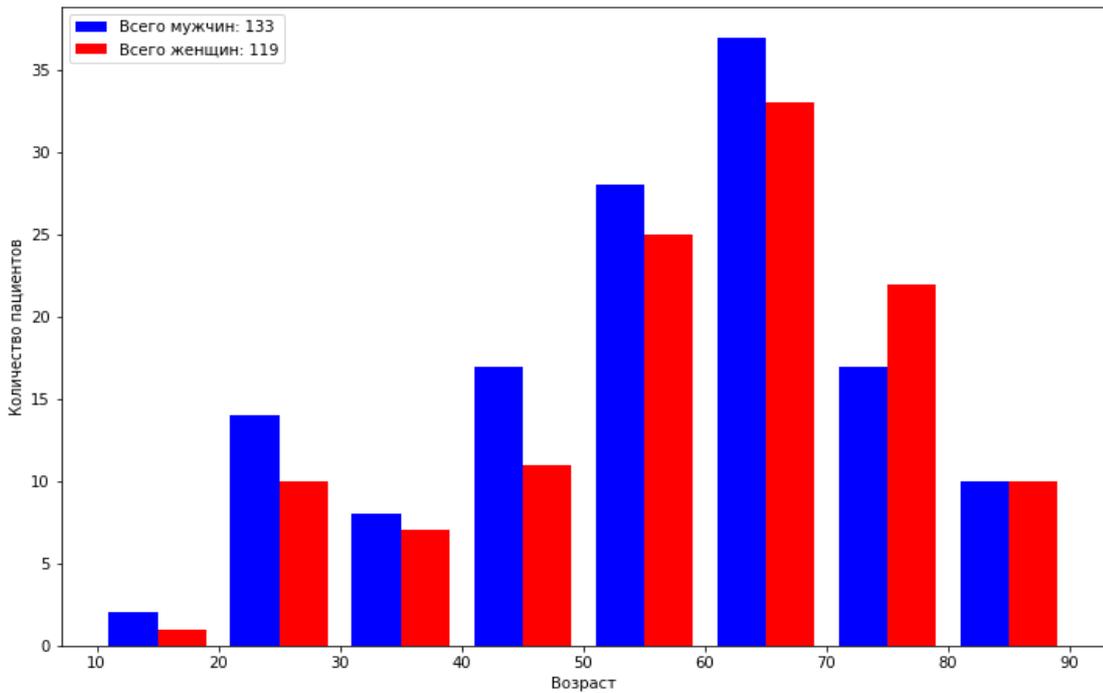


Рисунок 1 – Распределение обследованных пациентов по полу и возрасту на первом этапе исследования

Дополнительно для выбора оптимального режима съемки определялся тип телосложения пациентов по классификации Ю. Р. Шейх-Заде и соавт. (2014):

$$ИТ = \left(\frac{М}{р^3}\right)^{1/2}$$

, где ИТ – индекс телосложения (условные единицы),

М – масса тела (кг),

Р – рост (м).

Индекс телосложения меньше 3,14 (женщины) и 3,21 (мужчины) – астенический тип; 3,14–3,84 (женщины) и 3,21–3,92 (мужчины) – нормостенический тип; больше 3,84 (женщины) и 3,92 (мужчины) – гиперстенический тип.

Распределение пациентов с учетом типа телосложения представлено в Таблице 1. Наибольшее количество больных ($n = 169$, 67,1 %) имели нормостенический тип.

Таблица 1 – Распределение пациентов по типу телосложения

Тип телосложения	Абс.	%	95 % ДИ
Гиперстенический	65	25,8	20,5–31,7
Нормостенический	169	67,1	60,9–72,8
Астенический	18	7,1	4,1–11,1

Выборка пациентов производилась в случайном порядке после проведенного осмотра терапевтом.

Основные критерии включения в работу:

- 1) возраст пациентов старше 18 лет;
- 2) наличие письменного информированного согласия пациента на участие в исследовании.

В исследование не включались:

- 1) пациенты в очень тяжелом состоянии, требующие проведения неотложных мероприятий;
- 2) беременные и кормящие грудью;
- 3) лица до 18 лет.

Второй этап – уточняющая диагностика, в рамках которой проводилось комплексное клиничко-лабораторное и лучевое обследование 50 пациентов: 27 мужчин и 23 женщин (Рисунок 2). Возрастной диапазон исследуемой группы от 23 до 79 лет (средний возраст 64 года). На втором этапе в исследование включались пациенты, у которых по данным стандартной рентгенографии были выявлены патологические изменения органов грудной клетки, требующие проведения уточняющей методики исследования.

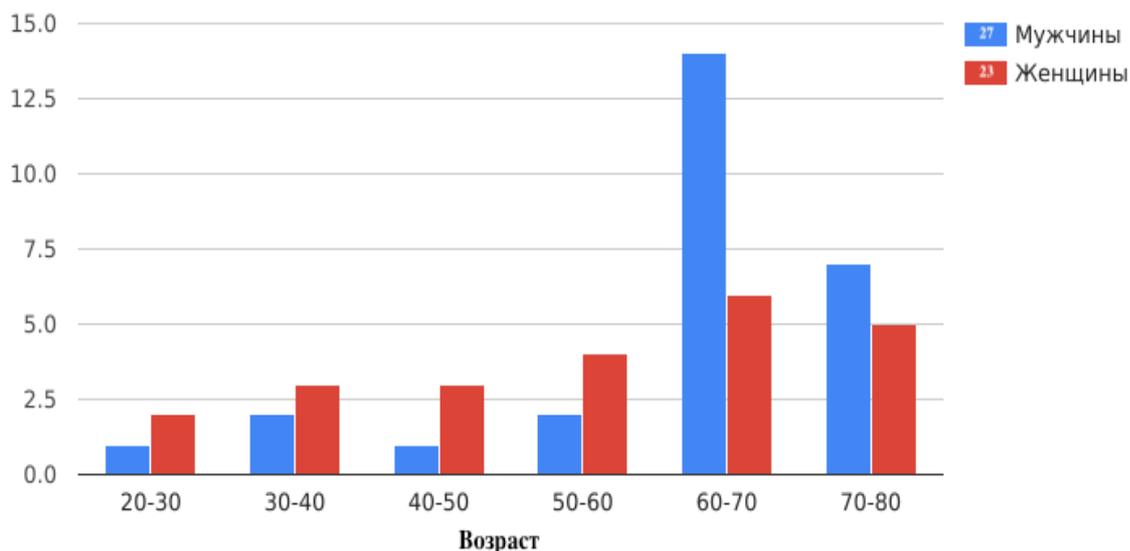


Рисунок 2 – Распределение обследованных пациентов по полу и возрасту на втором этапе исследования

Клинические методы исследования включали изучение жалоб, анамнеза и данных физикального осмотра (пальпация, перкуссия, аускультация легких). В качестве лабораторной диагностики всем пациентам ($n = 50$) выполнялся общий клинический и биохимический анализы крови, коагулограмма, общий анализ мочи. Также 13 больным (26,0 %) были проведены цитологическое и бактериологическое исследования мокроты. В 16,0 % случаев выполнялось цитоморфологическое исследование костного мозга.

2.3. Лучевые методы исследования

На первом этапе всем пациентам ($n = 252$) была выполнена ЦР и ДЭР органов грудной клетки. На втором этапе дополнительно была проведена ДЭР 50 пациентам с последующим дообследованием при помощи уточняющих томографических методик – МСКТ (Рисунок 3).

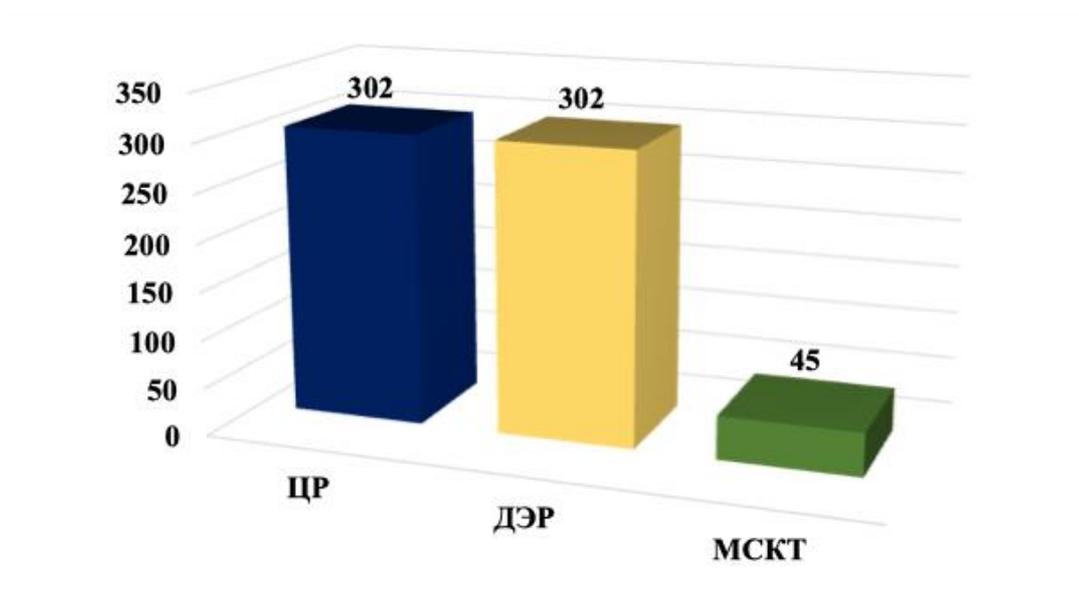


Рисунок 3 – Суммарное количество выполненных рентгенологических исследований на двух этапах исследования

2.3.1. Цифровая рентгенография

Исследования выполнялись на цифровых рентгенодиагностических системах «ТелеКоРД-МТ-Плюс» (АО «МТЛ», Россия), «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия).

Рентгенография проводилась при следующих физико-технических условиях: расстояние «источник–приемник» – 180 см, напряжение на трубке 110–120 кВ, сила тока – 320 мА.

Исследование выполнялось по стандартной методике с задержкой дыхания после умеренного вдоха. Обзорные рентгенограммы органов грудной клетки выполняли в прямой ($n = 168, 55,6 \%$) или прямой и боковой проекциях ($n = 134, 44,3 \%$). В зависимости от степени тяжести состояния пациента, возможности больного находиться в вертикальном положении рентгенография проводилась стоя ($n = 227, 75,1 \%$) или сидя, лежа на спине ($n = 75, 24,8 \%$).

Далее оформлялся протокол исследования с описанием, заключением и рекомендациями по дальнейшему обследованию.

2.3.2. Двухэнергетическая рентгенография

Двухэнергетическая рентгенография проводилась на аппаратах «ТелеКоРД-МТ-Плюс» (АО «МТЛ», Россия), «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия). Для получения реконструированных изображений мягких и костной тканей использовались следующие физико-технические характеристики (Таблица 2).

Таблица 2 – Технические параметры исследований пациентов с учетом их типа телосложения

Тип телосложения	Напряжение, кВ	Сила тока, мА
Астенический	60/120	160
Нормостенический	60/120	500
Гиперстенический	70/130	500

Расстояние «источник–приемник» составляло 180 см. Все исследования выполнялись с дополнительным фильтрующим слоем из 1 мм алюминия и 0,2 мм меди и растром.

Методика проведения ДЭР не отличалась от методики проведения стандартной цифровой рентгенографии. Исследование выполнялось в прямой проекции в двух положениях: стоя ($n = 227, 75,1 \%$) или лежа на спине ($n = 75, 24,8 \%$).

Результатом проведенного исследования являлось получение к стандартной рентгенограмме двух дополнительных реконструированных изображений – с подавлением мягких и костной тканей (Рисунок 4).

Далее полученные рентгенограммы отправлялись на рабочую станцию врача-рентгенолога «ИнтеГРИС-МТ-Плюс» (АО «МТЛ», Россия) для дальнейшего анализа.



Рисунок 4 – Двухэнергетическая рентгенография органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – реконструированное мягкотканное изображение (РИМТ); *в* – реконструированное костное изображение (РИКТ)

Анализ отдельных изображений мягких и костной тканей производился в следующем порядке:

- 1) оценка качества реконструированных изображений (удовлетворительное, неудовлетворительное);
- 2) оценка правильности укладки пациента;
- 3) состояние костных структур при «жестком» режиме съемки (подробное описание с указанием положения, величины, формы, структуры ключиц, ребер, лопаток, головок плечевых костей, грудных и нижних шейных позвонков; в отношении ребер определялась их симметричность и ширина межреберных промежутков);
- 4) состояние мягких тканей, легких и средостения при «мягком» режиме съемки;
- 5) сравнительная оценка легочных полей (форма, симметричность, прозрачность, подробное описание выявленных патологических элементов с указанием локализации процесса, структуры, контура, интенсивности, размеров);
- 6) состояние легочного рисунка (усиление, обеднение, сгущение, деформация);

7) состояние корней легких (положение, форма, структура, ширина, наличие патологических включений);

8) состояние мягких тканей (структура, объем, наличие инородных тел, свободного газа).

2.3.3. Мультисрезовая компьютерная томография

Мультисрезовая компьютерная томография проводилась на аппарате Aquilion Prime 160 (Toshiba, Япония) с толщиной среза 1 мм. Исследование выполнено 45 пациентам в среднем на 3–4-е сутки после выполнения ЦР и ДЭР. Обследование проводилось в положении больного лежа на спине с запрокинутыми руками над головой с задержкой дыхания на глубине вдоха в кранио-каудальном направлении.

МСКТ выполнялась при следующих физико-технических условиях: напряжение на рентгеновской трубке – 120 кВ, экспозиция одного среза – 90 мАс, шаг спирали – 3,5, инкремент реконструкции – 0,5 мм, без наклона гентри.

Анализ полученных данных производился с использованием программного обеспечения OsiriX 11.0 Lite (Pixmeo SARL, Швейцария).

В 6 случаях для исключения тромбоэмболии легочной артерии проводилось внутривенное болюсное введение водорастворимого контрастного средства, в качестве которого применялся Ультравист (370 мг йода/мл). Ни у одного пациента аллергические реакции и побочные эффекты не были выявлены.

Фактически МСКТ являлась референтным методом по отношению к ДЭР.

2.4. Методы статистической обработки полученных результатов

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью программного обеспечения STATISTICA ver. 12 (StatSoft. Inc., USA) и программы StatTech v. 4.0.7 (разработчик – ООО «Статтех», Россия).

Количественные показатели оценивались на предмет соответствия нормальному распределению с помощью критерия Шапиро – Уилка (при числе исследуемых менее 50) или критерия Колмогорова – Смирнова (при числе

исследуемых более 50). В случае отсутствия нормального распределения количественные данные описывались с помощью медианы (Me) и нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3).

Направление и теснота корреляционной связи между двумя количественными показателями оценивались с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (при распределении показателей, отличном от нормального).

Учитывая тот факт, что в анализе результатов принимали участие 5 врачей-рентгенологов, уровень межэкспертной согласованности определялся с использованием коэффициента каппа Флейса. Интерпретация значений выполнялась с применением шкалы J. R. Landis и G. G. Kock (1977), согласно которой коэффициент 0–0,2 – слабый уровень согласия, 0,21–0,4 – незначимый, 0,41–0,6 – умеренный, 0,61–0,8 – существенный, 0,81–1,0 – полное согласие.

Номинальные данные описывались с указанием абсолютных значений и процентных долей (частот).

Диагностическая эффективность ДЭР и ЦР были определены по следующим показателям:

- чувствительность (%) = $\text{ИП}/(\text{ИП}+\text{ЛО})$;
- специфичность (%) = $\text{ИО}/(\text{ИО}+\text{ЛП})$;
- точность диагностического метода (%) = $[(\text{ИП}+\text{ИО})/(\text{ИП}+\text{ИО}+\text{ЛП}+\text{ЛО})]$;
- прогностическая точность положительных результатов (%) = $\text{ИП}/(\text{ИП}+\text{ЛП})$;
- прогностическая точность отрицательных результатов (%) = $\text{ИО}/(\text{ИО}+\text{ЛО})$,

где ИП – истинно положительные результаты, ИО – истинно отрицательные результаты, ЛП – ложноположительные результаты, ЛО – ложноотрицательные результаты.

Для всех долей (частот) рассчитывался 95 % доверительный интервал (ДИ). В случае отсутствия пересечения ДИ различия показателей признавались статистически значимыми ($p < 0,05$).

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая предыдущий опыт применения ДЭР, наибольшие трудности возникали при получении РИКТ, что связано с наличием выраженных артефактов «зернистости», ограничивающих применение методики на клиническом этапе. В рамках данного экспериментального исследования оценивалось влияние значений анодного напряжения на качество реконструированных изображений.

С целью определения возможностей и ограничений ДЭР в исследовании тканей различной плотности был создан специализированный тест-объект (патент № RU 204909 U1 от 17.06.2021) [36].

Тест-объект включал в себя семь древних шейных позвонков, пластиковые структуры, имитирующие трахею, главные бронхи, позвоночные артерии с кальцинированными атеросклеротическими бляшками из синтетического костно-пластического материала (Рисунок 5).

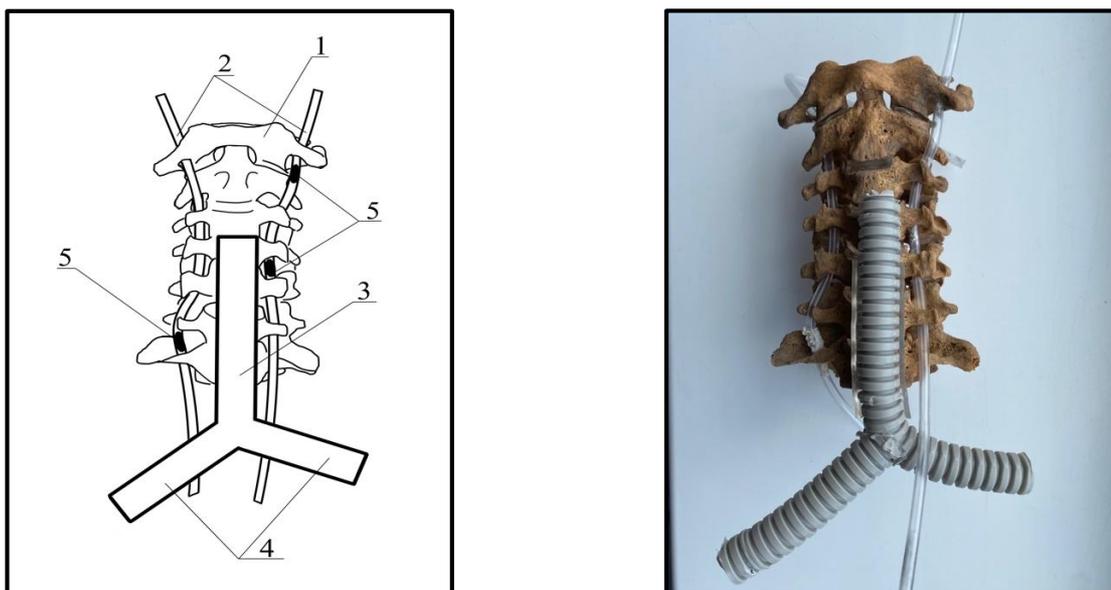


Рисунок 5 – Схема и фотография тест-объекта: 1 – шейные позвонки, 2 – позвоночные артерии, 3 – трахея, 4 – главные бронхи, 5 – кальцинированные атеросклеротические бляшки

Возможности ДЭР в «разделении» тканей различной плотности определялись при визуальном сравнительном анализе серий изображений, полученных на цифровой системе «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония) с плоскопанельным детектором высокого разрешения, размер пикселя

которого составляет 65 мкм, и на рентгеновском аппарате «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия), оснащенный плоскопанельным детектором с пикселем 148 мкм.

На первом этапе получены эталонные изображения тест-объекта на диагностической системе «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония) при следующих физико-технических условиях: напряжение – 26/40 кВ, сила тока – 100 мА, фокусное расстояние – 65 см, на которых четко демонстрируется «разделение» структур тест-объекта различной плотности (Рисунок 6).

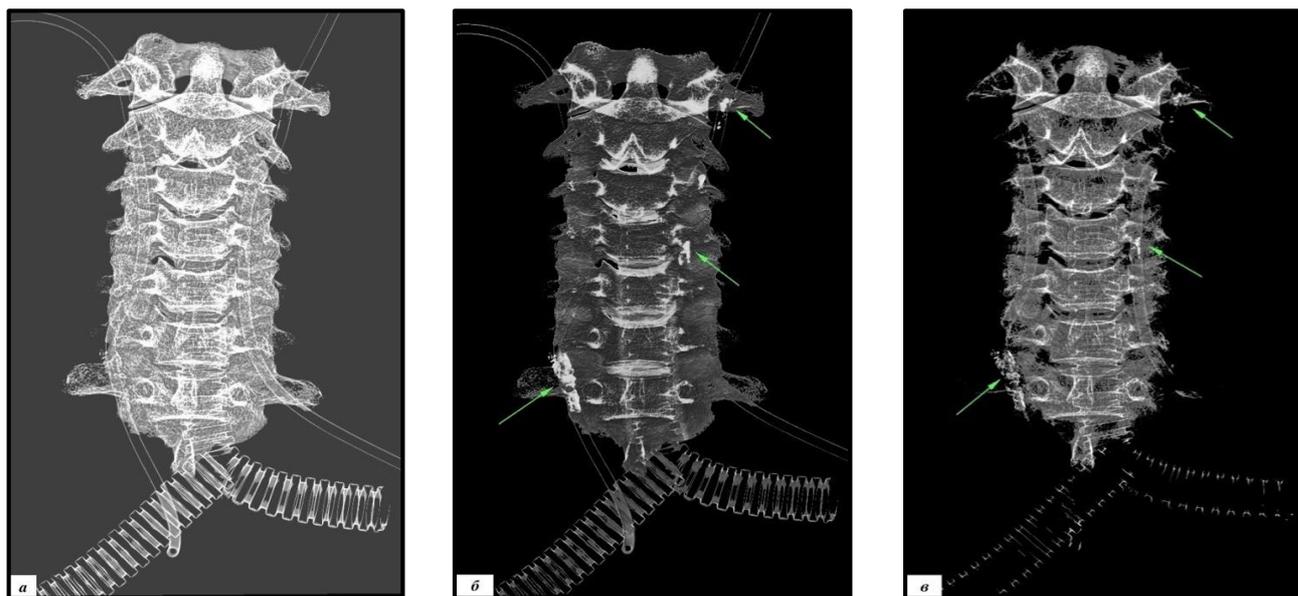


Рисунок 6 – Рентгенограммы тест-объекта, полученные на аппарате «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония): *а* – мягкотканное реконструированное изображение. Кальцинированные атеросклеротические бляшки в позвоночных артериях не визуализируются; *б* – стандартная рентгенограмма. Атеросклеротические бляшки (*стрелки*); *в* – костное реконструированное изображение. Частичное «удаление» позвоночных артерий, главных бронхов. Атеросклеротические бляшки (*стрелки*)

Далее исследование тест-объекта проводилось на стационарном рентгеновском аппарате «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия) при следующих физико-технических условиях, которые в рамках экспериментального исследования были постоянными: сила тока – 160 мА, фокусное расстояние – 100 см, с наличием стандартного фильтра из 1 мм алюминия и 0,2 мм меди. Съемка тест-объекта проводилась при следующих значениях анодного напряжения: 60/100, 60/120 и 70/130 кВ (Рисунок 7).

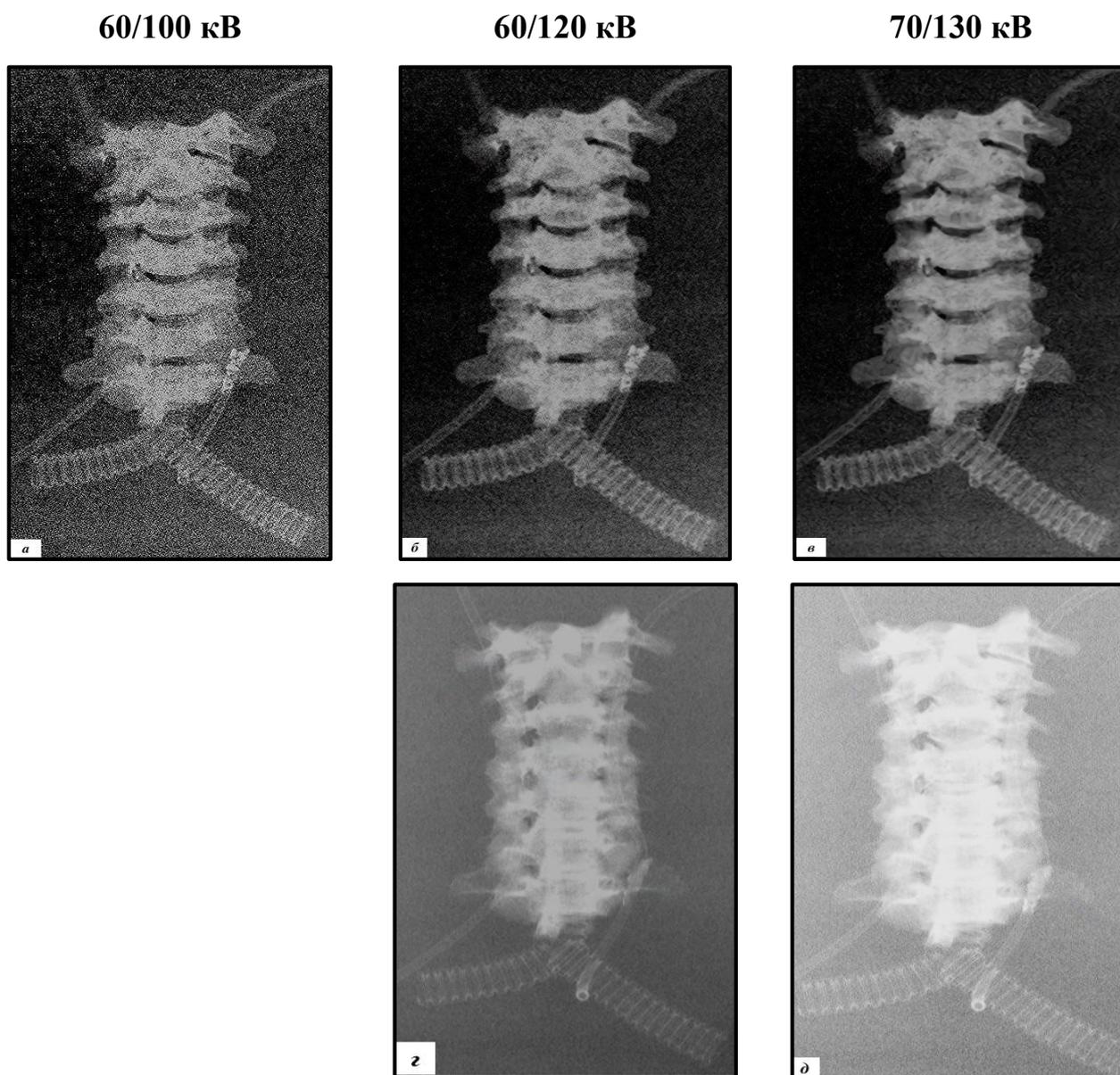


Рисунок 7 – Рентгенограммы тест-объекта, полученные на рентгеновском аппарате «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия) при разных значениях анодного напряжения: *а* – костное реконструированное изображение, 60/100 кВ; *б*, *г* – костное и мягкотканное изображения, 60/120 кВ; *в*, *д* – костное и мягкотканное изображения, 70/130 кВ

При работе с плоскопанельным детектором для стационарных диагностических систем было достигнуто частичное «разделение» структур различной плотности. При использовании пары напряжений 60/120 кВ на РИКТ визуализировались артефакты «зернистости», затрудняющие оценку костных структур тест-объекта. При повышении значений анодного напряжения наблюдалось уменьшение выраженности «зернистости» на РИКТ, сопровождающееся снижением качества дифференцировки структур различной

плотности на реконструированных изображениях (рисунок 6, д) [6]. Обобщенные результаты исследования тест-объекта представлены в Таблице 3.

Таблица 3 – Влияние значений напряжения на качество реконструированных изображений

	Анодное напряжение, кВ		
	60/100	60/120	70/130
Костный режим	–	+	+
Мягкотканый режим	+	+	–

Примечание: «+» – удовлетворительное качество изображений, подлежит оценке; «–» – неудовлетворительное качество изображений, данные не подлежат интерпретации.

Учитывая полученные результаты, были определены значения анодного напряжения для получения реконструированных изображений оптимального качества на клиническом этапе исследования. Так, при выполнении съемки на низких энергиях напряжение не должно превышать 60 кВ, а при работе на высоких энергиях должно быть не менее 120 кВ [57; 134].

В дальнейшем, с внедрением в работу эффективных алгоритмов шумоподавления искусственными нейронными сетями, данные рекомендации были скорректированы и дополнены с учетом типа телосложения пациента.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ СКРИНИНГОВОГО РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ

Основой работы послужили результаты рентгенологического обследования органов грудной клетки 252 пациентов (133 мужчины и 119 женщин, средний возраст 60 лет, Q_1 – Q_3 : 48–69 лет). База данных цифровых рентгенограмм, полученных в ходе ДЭР, была зарегистрирована в виде электронного ресурса (свидетельство № 2021621801 от 25.08.2021) [44].

В представленной группе пациентов активные жалобы со стороны органов дыхания отсутствовали у 164 пациентов (65,0 %), отмечался продуктивный кашель у 11 пациентов (4,4 %), сухой кашель у 27 пациентов (10,7 %), нарастание выраженности одышки у 36 пациентов (14,2 %), боль в области грудной клетки у 14 пациентов (5,5 %).

На данном этапе была получена и проанализирована 751 рентгенограмма. Анализ изображений выполнялся в два этапа: на первом – интерпретация стандартных рентгенограмм с РИМТ, на втором – в совокупности с РИКТ. Пять серий изображений не были включены в статистическую обработку в связи отсутствием стандартных рентгенограмм.

Для анализа полученных рентгенограмм была разработана шкала оценок от -1 до 2 с соответствующими критериями (Таблица 4) [5; 25].

Таблица 4 – Критерии оценки эффективности ДЭР

Оценка	Критерии анализа изображения
-1	Реконструкция отрицательно влияет на результаты и может способствовать ятрогении
0	Реконструкция не влияет на результаты, дополнительная информация не получена
1	Реконструкция положительно влияет на результаты, получена дополнительная информация в виде улучшения визуализации анатомических и патологических структур
2	Реконструкция положительно влияет на результаты, получена новая информация в виде визуализации структур, которые не определяются на стандартной рентгенограмме

В исследовании приняли участие 5 врачей-рентгенологов, среди которых специалисты имели опыт работы до 10 лет ($n = 3$) и более 10 лет ($n = 2$). Все врачи

работали в различных по специфике и количеству исследований медицинских учреждениях.

4.1. Анализ стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИМТ

По данным анализа стандартной рентгенограммы и РИМТ были выявлены следующие изменения: ателектаз, воспалительная инфильтрация, гидроторакс, изменение легочного рисунка, образования и очаговые изменения легких, деструкция легочной ткани, расширение тени средостения, релаксация купола диафрагмы, декстропозиция органов средостения. За образование принимался участок затемнения, имеющий форму круга, полукруга или овала диаметром более 1,5 см. Соответственно изменения аналогичного характера, имеющие меньший диаметр, расценивались как очаговые. К вариантам изменения легочного рисунка относились его усиление, обеднение и деформация за счет интерстициального или сосудистого компонента. За расширение тени средостения принималось увеличение кардиоторакального индекса более 50 %.

Результаты проведенного анализа стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИМТ, представлены в Таблице 5 и на Рисунке 8.

Таблица 5 – Экспертные оценки по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИМТ в соответствии с выявленными изменениями органов грудной клетки

Признак	Врач 1		Врач 2		Врач 3		Врач 4		Врач 5	
	Me	N	Me	N	Me	N	Me	N	Me	N
Изменения не выявлены	0,0	74	0,5	88	0,0	86	0,0	102	0,0	99
Воспалительная инфильтрация	1,0	8	1,0	7	1,0	7	1,0	10	1,0	7
Гидроторакс	0,5	28	0,0	25	0,0	20	0,0	19	0,0	23
Декстропозиция органов средостения	1,0	1	1,0	1	0,0	1	0,0	1	0,0	1
Изменение легочного рисунка	0,0	110	1,0	99	0,0	102	0,0	89	0,0	88
Ателектаз	1,0	4	0,5	4	1,0	3	1,0	3	0,0	4
Образование легкого	1,0	5	1,0	5	1,0	4	1,0	5	1,0	5

Продолжение таблицы 5

Очаговые изменения	1,0	8	1,0	8	1,0	7	1,5	8	1,0	10
Полость деструкции	2,0	1	2,0	1	2,0	1	2,0	1	1,0	1
Расширение тени средостения	0,5	6	1,0	5	0,0	12	0,0	7	1,0	7
Релаксация купола диафрагмы	0,0	2	0,5	2	0,0	2	0,0	1	0,0	1

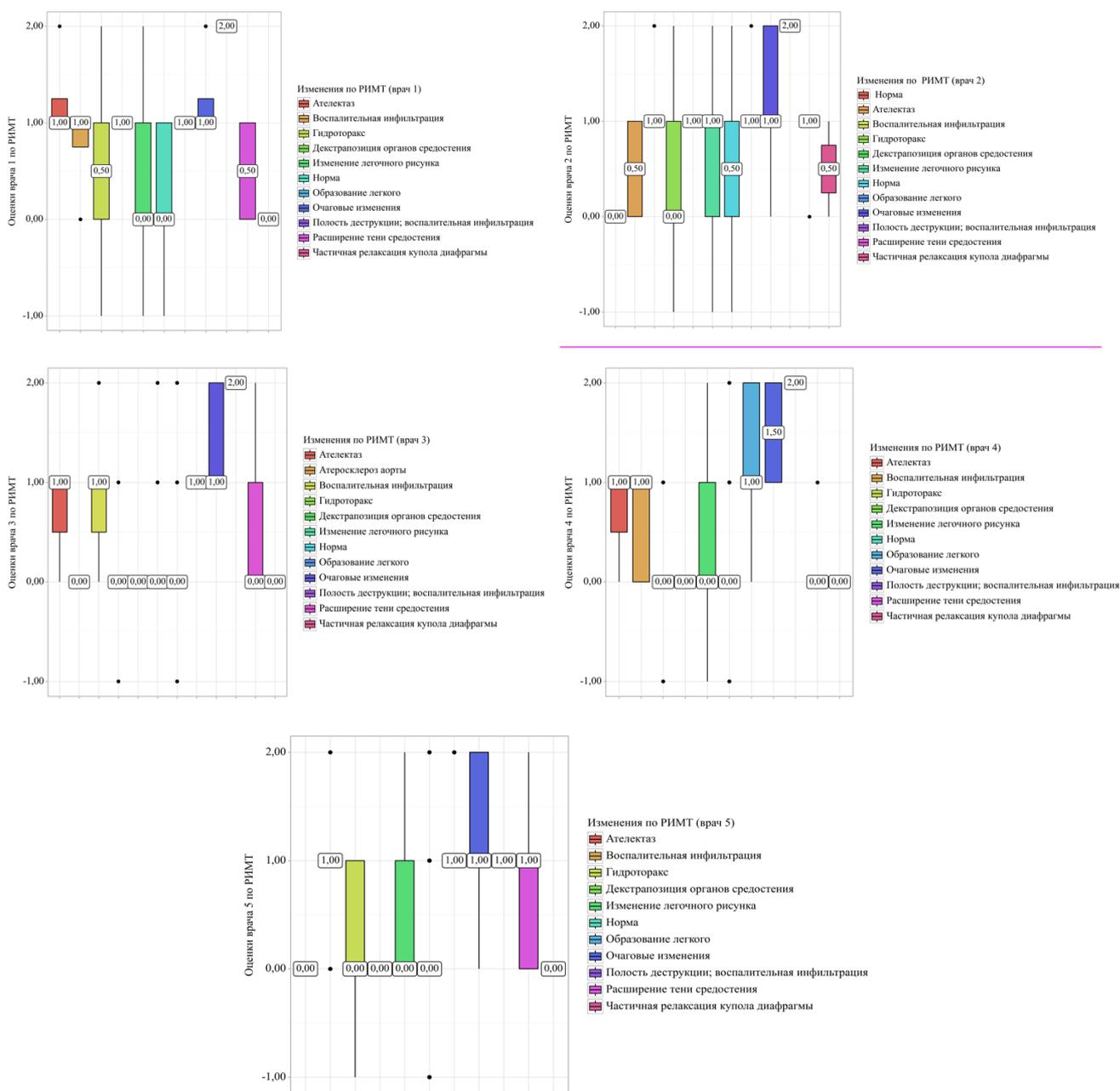


Рисунок 8 – Диаграммы boxplot, отражающие распределение оценок экспертов по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИМТ в зависимости от выявленных изменений

Коэффициент межэкспертного согласия (каппа Флейса) по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИМТ составил 0,52, что соответствует умеренной степени согласия по шкале J. R. Landis и G. G. Kock (1977).

Мягкотканная реконструкция, по оценкам врачей-рентгенологов, позволила добиться улучшения визуализации анатомических и патологических структур, получить дополнительную информацию в 38 % случаев.

ДЭР, удаляя тени от наслаивающихся рёбер, значительно упрощала интерпретацию легочного рисунка, а именно на РИМТ определяется значительно больше элементов, включая мельчайшие компоненты. В случаях преобладания интерстициального компонента, в зависимости от выраженности изменений, можно было наблюдать от легкой петлеобразной деформации легочного рисунка до плотных фиброзных тяжей, формирующих грубую ячеистую структуру. При преобладании сосудистого компонента, на РИМТ хорошо были различимы тени расширенных сосудов, которые на обычных рентгенограммах, как правило, были скрыты тенями ребер. Более того, ортогональные проекции сосудов не имели отображение на РИКТ, что помогало в дифференциальной диагностике с плотными узелковыми тенями и кальцинированными образованиями.

Очень важным достоинством данного исследования оказалась способность ДЭР в визуализации очагов средней интенсивности и образований легких, перекрывающихся тенью ребер и ключиц на стандартной рентгенограмме (Рисунок 9) [5; 27].

Реконструированные изображения позволили более детально оценить границы, структуру образований, наличие изменений в окружающей ткани (Рисунок 10).

Все пять экспертов отметили положительное влияние мягкотканной реконструкции в группе пациентов с выявленными инфильтративными изменениями, в одном случае с признаками деструкции легочной ткани в виде более точной оценки объема поражения, структуры затемнения, наличия содержимого в полости распада (Рисунок 11).

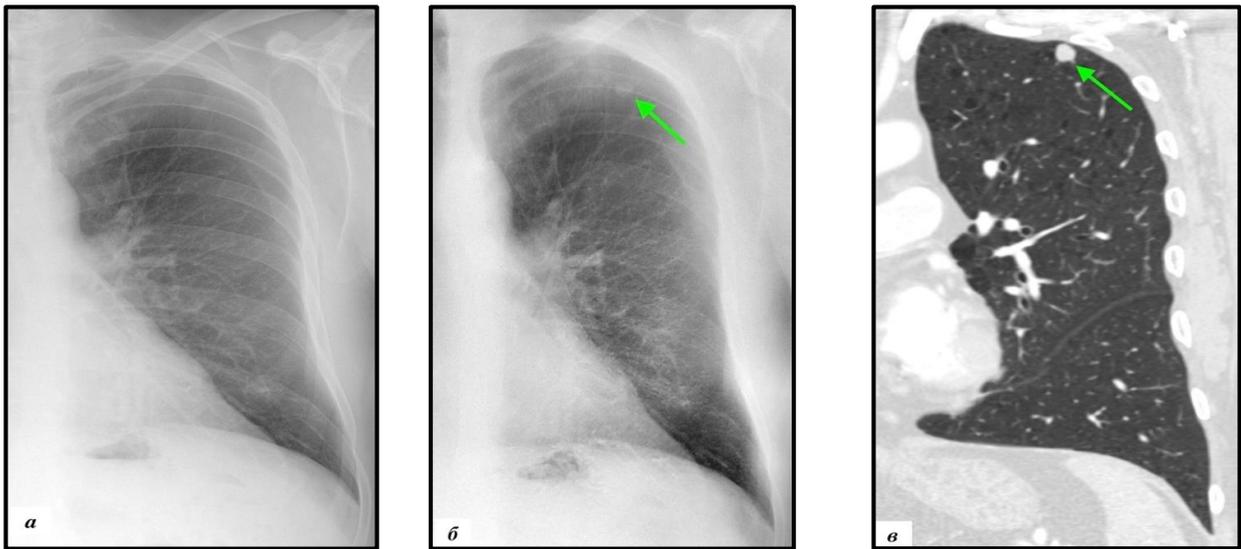


Рисунок 9 – Данные лучевого обследования: *а* – стандартная рентгенограмма: достоверно патологические изменения в левом легком не визуализируются; *б* – РИМТ: в верхней доле левого легкого определяется очаг средней интенсивности (*стрелка*), перекрывающийся тенью заднего отрезка 4-го ребра, который не визуализируется на стандартной рентгенограмме (*а*) даже ретроспективно; *в* – компьютерная томограмма (МПР, фронтальная плоскость, легочное окно) подтверждает наличие солидного очага диаметром 8 мм в верхушечно-заднем сегменте (S1+2) (*стрелка*)

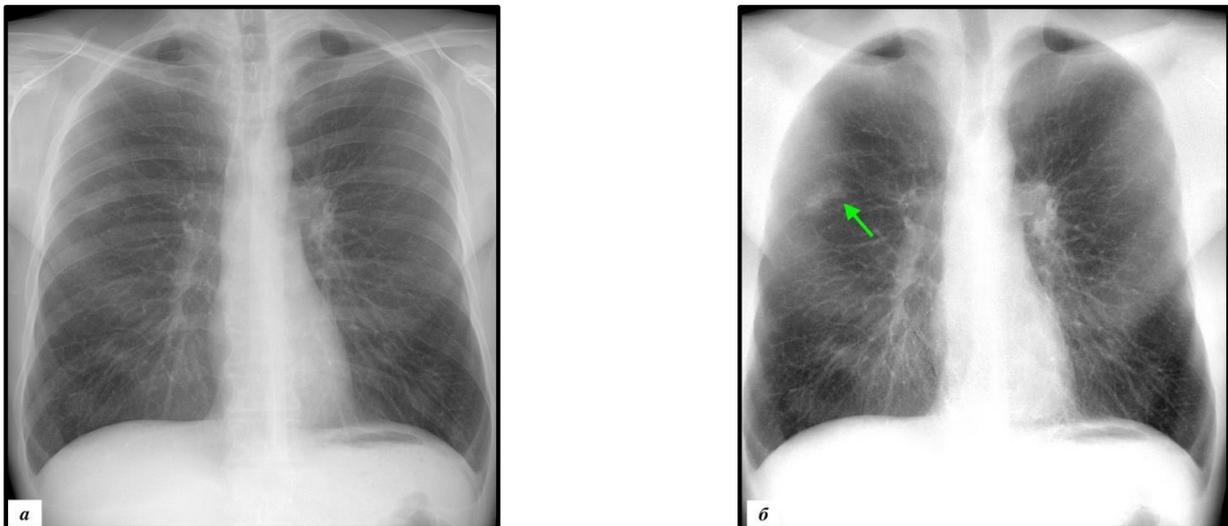


Рисунок 10 – ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – РИМТ. В верхней доле правого легкого определяется образование средней интенсивности размерами 31×17 мм с тяжами, идущими к плевре (*стрелка*). Костальная плевра на этом уровне утолщена. Выявленные изменения на стандартной рентгенограмме не визуализируются даже ретроспективно

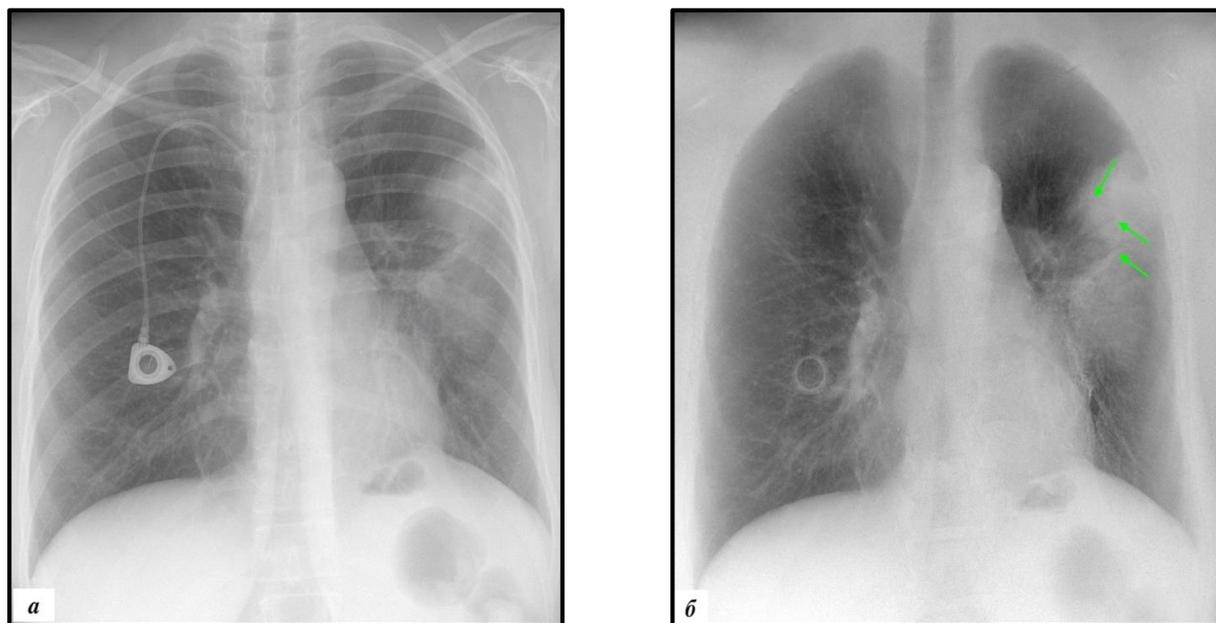


Рисунок 11 – ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма: в левом легком определяется ограниченный участок затемнения; *б* – РИМТ: в структуре затемнения прослеживаются просветы долевых бронхов, заполненные воздухом (симптом «воздушной бронхографии») (*стрелки*)

4.2. Анализ стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИКТ

При интерпретации стандартных рентгенограмм, дополненных РИКТ, определялись следующие изменения: свежие и консолидированные переломы ребер, очаги деструкции ребер, ключиц, лопаток, проксимальных отделов плечевых костей, остеосклеротические очаги, кальцинированные атеросклеротические бляшки в стенках аорты, обызвествленные внутригрудные лимфатические узлы, кальцинаты в паренхиме легких, медицинские инородные предметы (трахеостомические трубки, центральные венозные катетеры (ЦВК), ЭКС, трансфузионные порт-системы).

Результаты проведенного анализа стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИКТ, представлены в Таблице 6 и на Рисунке 12.

Таблица 6 – Экспертные оценки по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИКТ в соответствии с выявленными изменениями органов грудной клетки

Признак	Врач 1		Врач 2		Врач 3		Врач 4		Врач 5	
	Me	N								
Изменения не выявлены	0,0	111	0,0	117	0,0	111	0,0	131	0,0	103
Консолидированные переломы ребер	1,0	11	2,0	12	1,0	11	2,0	10	1,5	10
Свежие переломы ребер	2,0	1	2,0	1	2,0	1	2,0	1	0,5	2
Очаги деструкции костной ткани + патологические переломы	0,5	2	1,0	1	0,5	2	0,5	2	1,5	2
Очаги деструкции костной ткани	1,0	8	2,0	9	2,0	7	1,0	7	1,5	8
Участки остеосклероза	1,0	3	1,0	3	1,0	3	0,5	2	2,0	1
Кальцинаты / кальцинированные лимфоузлы	1,0	10	1,0	10	1,0	11	1,0	9	2,0	14
Атеросклеротические изменения	0,0	85	1,0	78	0,0	84	0,0	69	0,0	90
Медицинские инородные предметы	0,0	16	0,0	16	0,0	16	0,0	16	0,0	16

Коэффициент межэкспертного согласия (каппа Флейса) по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИКТ составил 0,55, что соответствует умеренной степени согласия по шкале J. R. Landis и G. G. Kock (1977).

Костная реконструкция позволила добиться улучшения визуализации анатомических и патологических структур, получить дополнительную информацию в 35 % случаев.

По результатам анализа оценок экспертов, ДЭР позволила более отчетливо определять обызвествленные внутригрудные лимфоузлы и дифференцировать кальцинаты от ортогонально расположенных сосудистых структур (Рисунок 13) [5].

Особенно эффективной изучаемая методика оказалась при обследовании пациентов с множественной миеломой [5; 2625]. Основная трудность, с которой

встречались врачи-рентгенологи при описании данной группы больных, – оценка изменений костной структуры. Реконструкция позволила повысить качество заключения за счет улучшения визуализации очагов деструкции в ребрах, ключицах, проксимальных отделах плечевых костей (Рисунок 14).

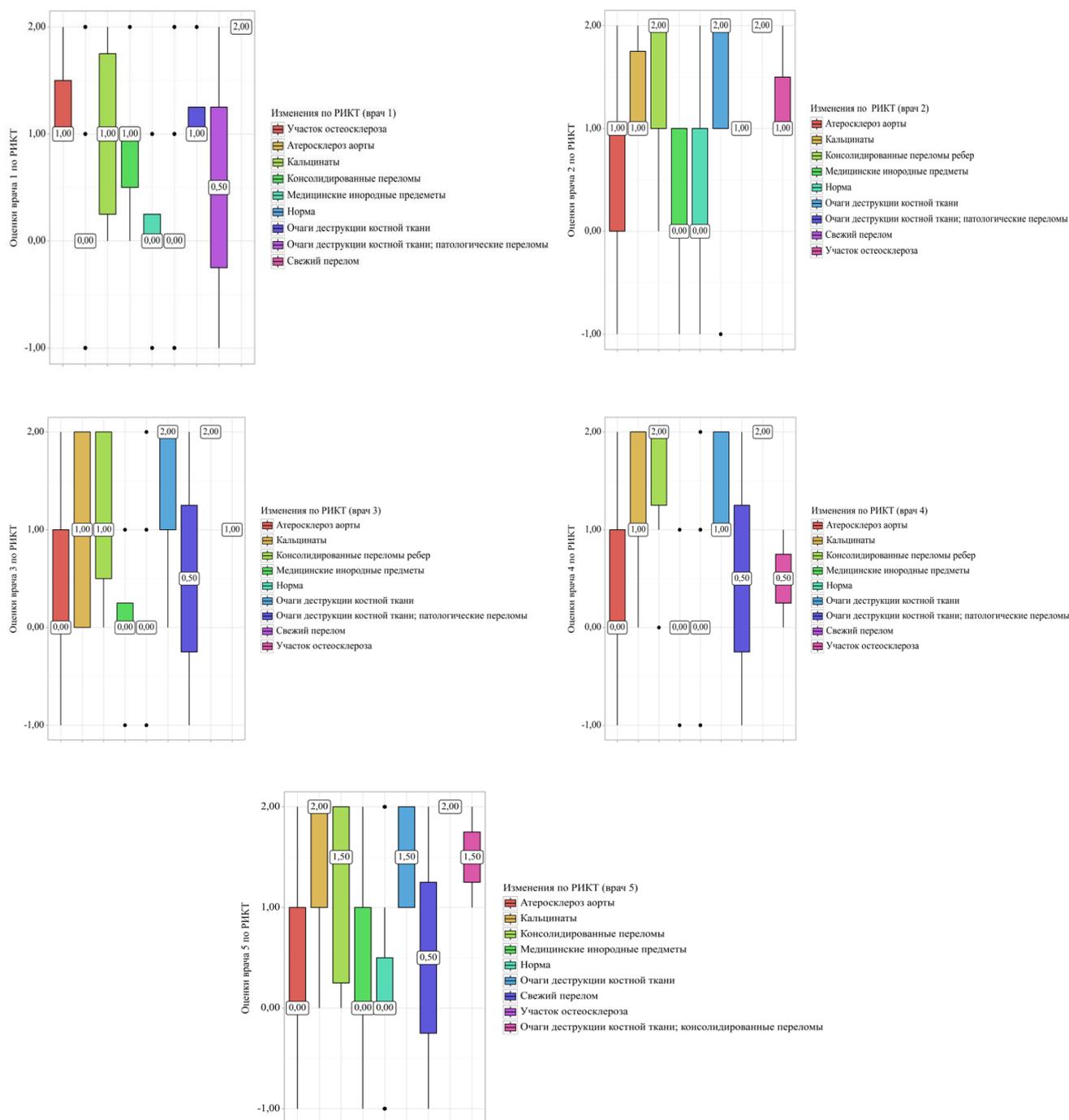


Рисунок 12 – Диаграммы boxplot, отражающие распределение оценок экспертов по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИКТ в зависимости от выявленных изменений

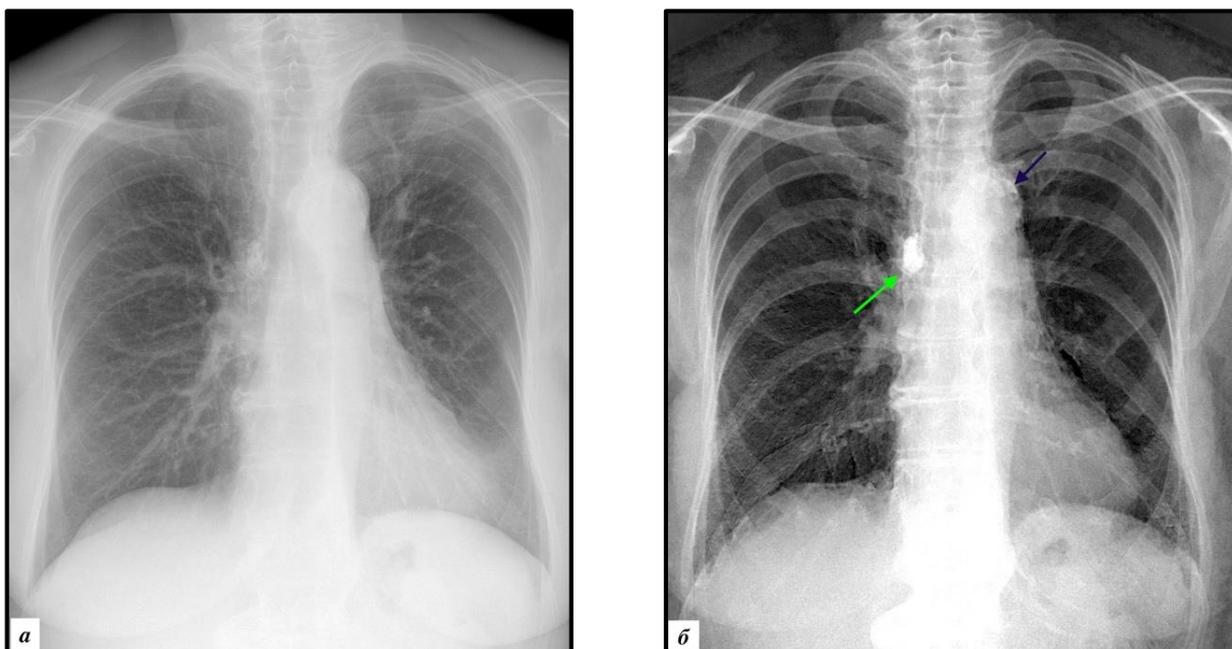


Рисунок 13 – ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – РИКТ. В проекции корня правого легкого определяется высокоинтенсивная тень округлой формы, наиболее вероятно, кальцинированный внутригрудной лимфоузел (*зеленая стрелка*), которая визуализируется на стандартной рентгенограмме только ретроспективно. Дополнительно реконструкция позволяет определить кальцинированные атеросклеротические бляшки в стенках дуги аорты (*синяя стрелка*)

Визуализация переломов ребер часто была затруднена при стандартной рентгенографии, особенно в боковых отделах грудной клетки, за счет суммационного эффекта и краевого снижения пространственного разрешения. На РИКТ переломы ребер определялись более отчетливо (Рисунок 15).

По оценкам экспертов, применение ДЭР не позволило получить дополнительную информацию в оценке атеросклеротических изменений аорты, установки медицинских изделий (ЦВК, ЭКС, трахеостомы, инфузионные порт-системы).

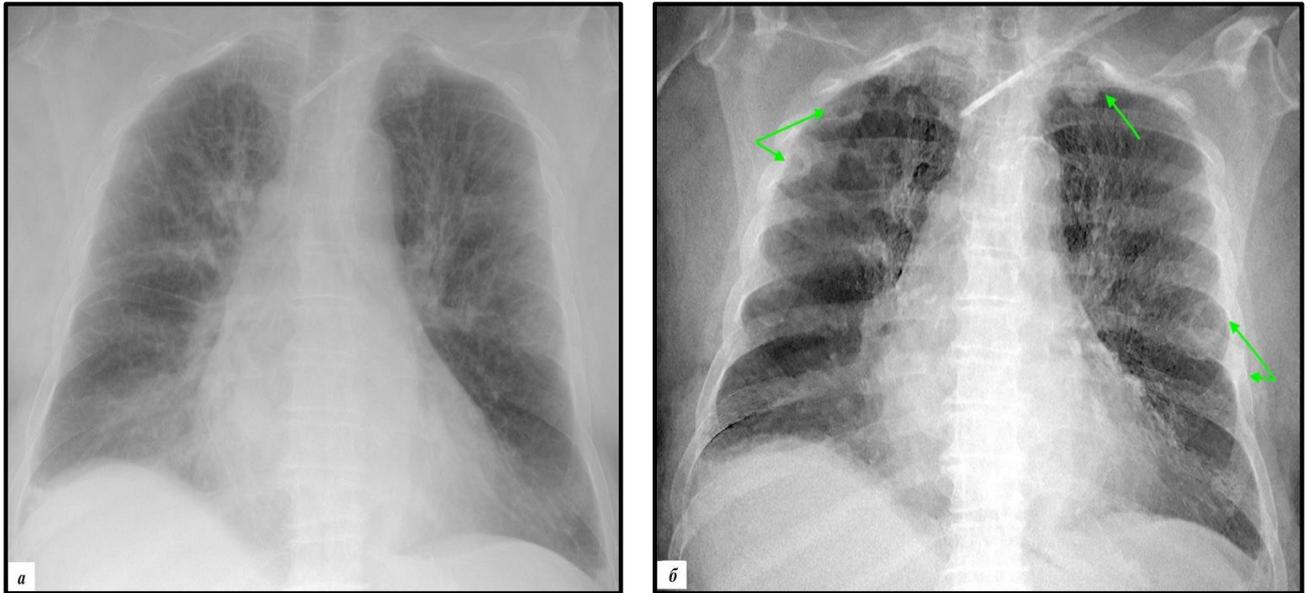


Рисунок 14 – ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции (лежа): *а* – стандартная рентгенограмма: в заднем отрезке 4-го ребра справа определяется консолидированный перелом; *б* – РИМТ: дополнительно визуализируются участки вздутия, патологические консолидированные переломы заднего отрезка 3-го ребра справа, передних отрезков 1-го и 5-го ребер слева, бокового отрезка 7-го ребра слева (*стрелки*). На этом фоне прослеживаются множественные очаги деструкции в ребрах

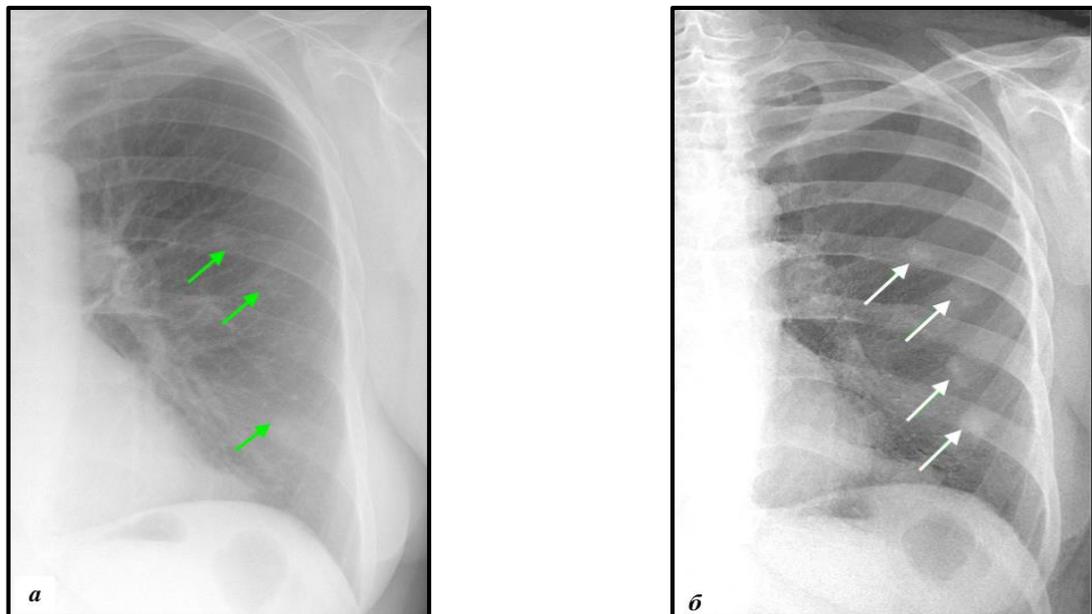


Рисунок 15 – ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма: в левом легком определяются участки сгущения легочного рисунка (*зеленые стрелки*); *б* – РИКТ: выявленные изменения соответствуют консолидированным переломам передних отрезков 3–6-го ребер (*белые стрелки*)

С целью определения взаимосвязи оценок за РИМТ и РИКТ был выполнен корреляционный анализ с расчетом коэффициента корреляции Спирмена (Таблица 7) [28].

Таблица 7 – Результаты корреляционного анализа взаимосвязи оценок за РИМТ и РИКТ

Показатели	Характеристика корреляционной связи		
	ρ	Теснота связи по шкале Чеддока	p
Оценки врача 1 за РИМТ – оценки врача 1 за РИКТ	0,036	Нет связи	0,573
Оценки врача 2 за РИМТ – оценки врача 2 за РИКТ	0,213	Слабая	< 0,001*
Оценки врача 3 за РИМТ – оценки врача 3 за РИКТ	0,079	Нет связи	0,219
Оценки врача 4 за РИМТ – оценки врача 4 за РИКТ	0,204	Слабая	0,001*
Оценки врача 5 за РИМТ – оценки врача 5 за РИКТ	0,122	Слабая	0,057

Примечание. * – различия показателей статистически значимы ($p < 0,05$).

Согласно результатам анализа, во всех случаях значимая связь между оценками за РИМТ и РИКТ не была выявлена [28].

4.3. Ограничения методики ДЭР

Были проанализированы реконструированные изображения, получившие отрицательные оценки экспертов (Таблица 8) [4].

Таблица 8 – Количество реконструированных изображений неудовлетворительного качества

Оценка		Врач 1		Врач 2		Врач 3		Врач 4		Врач 5		p
		N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	
РИМТ	-1,00	5	2,0	6	2,4	4	1,6	10	4,0	7	2,8	0,494
РИКТ	-1,00	24	9,6	36	14,4	19	7,6	26	10,4	28	11,2	0,163

Наибольшее количество реконструированных изображений неудовлетворительного качества определялось среди костных изображений. Во всех случаях врачи-рентгенологи отмечали выраженную «зернистость» на РИКТ, что существенно затрудняло интерпретацию и не позволяло в полном объеме изучить структуру костной ткани, увеличивая риск пропуска мелких деталей.

С одинаковой частотой на РИМТ и РИКТ встречались двигательные артефакты от пульсирующих сосудов, сердца, дыхательных движений, что объясняется физическими особенностями получения реконструкций с применением двухимпульсной последовательности. Минимальное время задержки между экспозициями составляло 300 мс, длительность окна накопления – 400 мс, что не позволяет при данных параметрах получать высококачественные изображения у пациентов с учащенным сердцебиением или выраженной одышкой [4; 24].

В 3 случаях на РИМТ определялось неполное подавление костных структур. Данный вид артефактов был наиболее клинически значимым, так как мог в большей степени привести к диагностическим ошибкам. На рентгенограммах визуализировались тени повышенной интенсивности, которые могли восприниматься врачами-рентгенологами как патологический процесс (Рисунок 16) [4; 29].

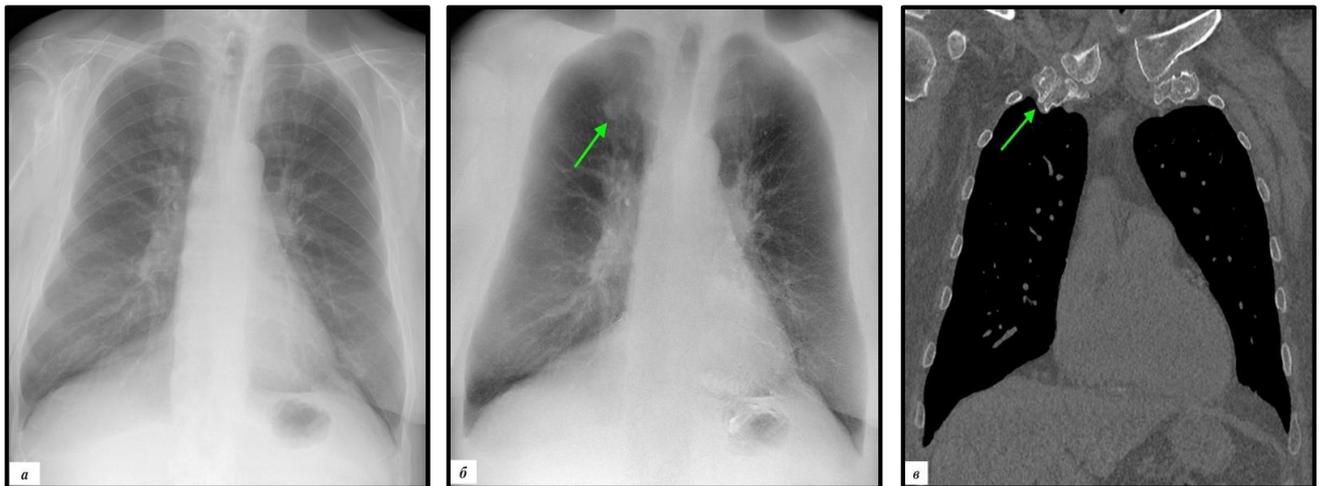


Рисунок 16. Данные лучевого обследования: *а* – стандартная рентгенограмма: достоверно патологические изменения не визуализируются; *б* – РИМТ: в верхней доле правого легкого очаг высокой плотности; *в* – компьютерная томограмма (МПР, фронтальная плоскость, костное окно) подтверждает, что субстратом данной диагностической ошибки стало неполное подавление сочленения 1-го ребра с грудиной

4.4. Исследование эффективной дозы облучения при ДЭР органов грудной клетки

В данной работе доза излучения ограничивалась устройствами автоматического контроля экспозиции и была одинаковой для реконструированных изображений мягких и костной тканей.

Средняя эффективная доза была рассчитана для 229 исследований согласно актуальным методическим указаниям МУ-2.6.1.2944-11 (Рисунок 17).

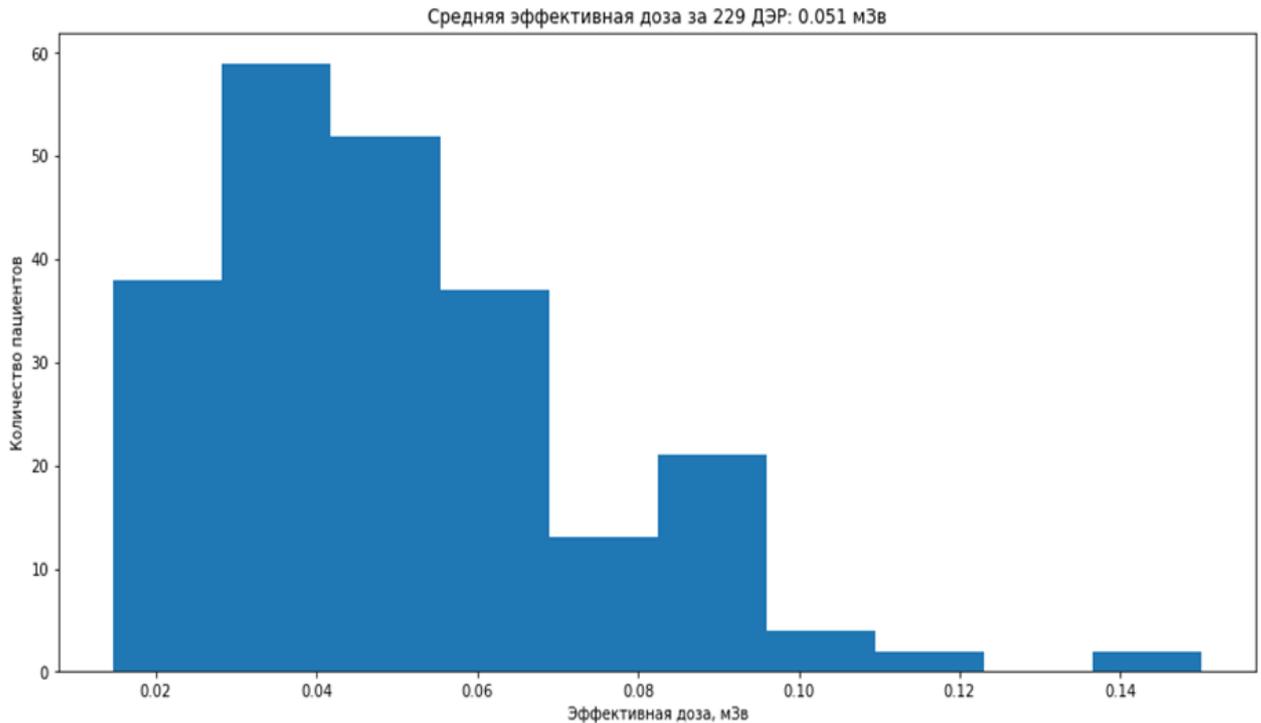


Рисунок 17 – Распределение эффективной дозы

Дозовая нагрузка составила 0,05 мЗв, что сопоставимо с лучевой нагрузкой при цифровой стандартной рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции и существенно меньше типичных лучевых нагрузок при применении томографических методик.

Таким образом, проанализировав данные лучевого обследования 252 пациентов, можно прийти к выводу, что в среднем отмечен положительный эффект от применения ДЭР.

Данная методика за счет разделения тканей позволила упростить диагностический поиск очагов и образований легких, более точно оценить структуру и объем инфильтрации легочной ткани, улучшить визуализацию

переломов ребер, литических очагов деструкции при сопоставимой дозовой нагрузке со стандартной рентгенограммой.

ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ЗАБОЛЕВАНИЯМИ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ

В ходе изучения диагностической эффективности ДЭР вторым этапом было проведение уточняющей диагностики в выборочной группе больных ($n = 50$) (27 мужчин и 23 женщины, средний возраст 64 года, Q_1 – Q_3 : 50–72 года), включающей пациентов с выявленными изменениями по данным ЦР органов грудной клетки.

Всем больным по клиническим показаниям выполнялась ДЭР органов грудной клетки. После проведения исследования анализ выполнялся в два этапа: на первом – интерпретация только стандартных рентгенограмм, на втором – в совокупности с реконструированными изображениями. База данных цифровых рентгенограмм и томограмм была зарегистрирована в виде электронного ресурса (свидетельство № 2024621640 от 15.04.2024) [44].

В анализируемой группе, согласно данным ЦР, были выявлены следующие патологические изменения: инфильтративные изменения – 12 (24,0 %), очаговые изменения и образования – 11 (22,0 %), деструкция легочной ткани – 7 (14,0 %), переломы ребер – 9 (18,0 %), очаговые костные деструкции – 11 (22,0 %) (Таблица 9) [7; 8].

Таблица 9 – Характеристика групп пациентов

Группы	Кол-во пациентов		Выявленный рентгенологический симптом	Кол-во пациентов		Пол		Возраст
	Абс.	%		Абс.	%	м	ж	
Легочная патология	30	60	Инфильтративные изменения	12	24	19	11	Me – 63
			Очаговые изменения и образования	11	22			Q1–Q3: 47–68
			Деструкция легочной ткани	7	14			
Костная патология	20	40	Переломы ребер	9	18	8	12	Me – 66,5
			Очаговые костные деструкции	11	22			Q1–Q3: 56–73

5.1. Оценка эффективности применения ДЭР в сравнении с ЦР в диагностике заболеваний легких

В общей группе пациентов в 24,0 % случаев на рентгенограммах определялись признаки инфильтративных изменений. Больные предъявляли жалобы на слабость, повышение температуры, продуктивный и сухой кашель, прогрессирующую одышку, потливость (Таблица 10).

Таблица 10 – Частота выявленных симптомов в группе пациентов с признаками инфильтративных изменений в легких

Наименование симптома	Количество пациентов	
	Абс., n	Отн., %
Слабость	9	75,0
Гипертермия	7	58,3
Продуктивный кашель	7	58,3
Сухой кашель	4	33,3
Одышка	3	25,0
Потливость	3	25,0

При объективном осмотре изменения перкуторного звука выявлены у 4 (33,3 %) пациентов, при аускультации у 8 (66,6 %) отмечалось изменение основного дыхательного шума и у 9 (75,0 %) больных выслушивались мелкопузырчатые влажные хрипы. По данным общего клинического анализа крови у 8 (66,6 %) пациентов определялся лейкоцитоз, в 4 (33,3 %) случаях – лейкопения.

На стандартных рентгенограммах участки затемнения, локализованные в нижней доле только правого легкого или левого легкого, встречались с одинаковой частотой у 6 (50,0 %) пациентов. В верхней доле правого легкого патологические изменения были выявлены у 2 (16,6 %) больных. В 33,3 % случаев наблюдалось двустороннее поражение.

Применение ДЭР позволило в 11 (91,6 %) случаях подтвердить наличие инфильтративных изменений, а в 7 (58,3 %) уточнить структуру затемнения и объем поражения (Рисунок 18). У 1 (8,3 %) пациента были выявлены клинически значимые изменения в виде полостей распада на фоне участков уплотнения

легочной ткани, которые не визуализировались на стандартном изображении (Рисунок 19). В 1 случае за симптом затемнения на рентгенограмме были приняты консолидированные переломы ребер [7].

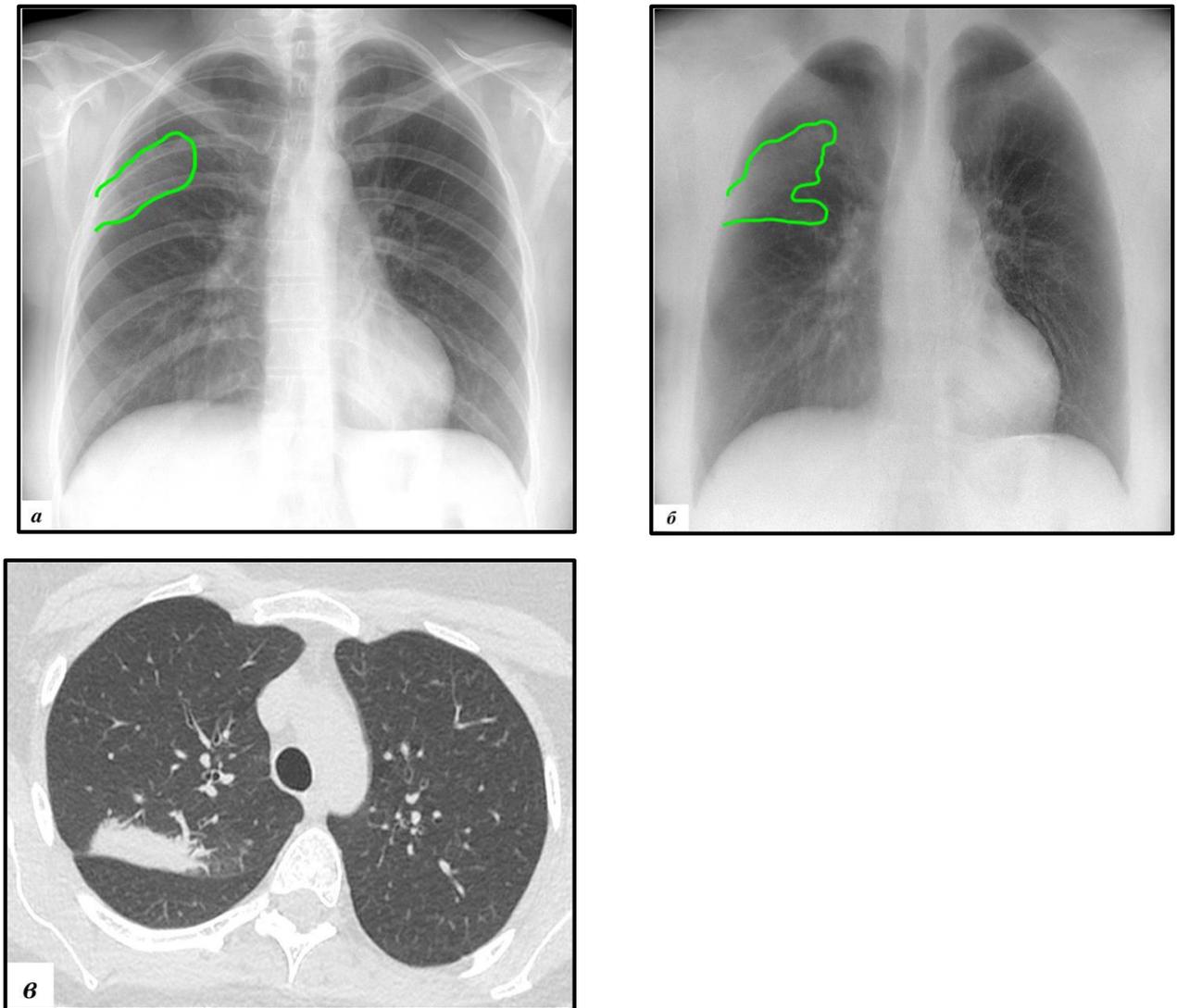


Рисунок 18 – Данные лучевого обследования пациента с нозокомиальной пневмонией, вызванной *Klebsiella pneumoniae*: *а* – стандартная рентгенограмма: в верхней доле правого легкого визуализируется участок затемнения (зеленой линией указаны границы затемнения); *б* – РИМТ: более четко определяются границы затемнения, дополнительно отмечается распространение инфильтрации по междолевой плевре; *в* – компьютерная томограмма (легочное окно): в заднем сегменте правого легкого (S2) участок уплотнения легочной ткани по типу консолидации, ограниченный междолевой плеврой

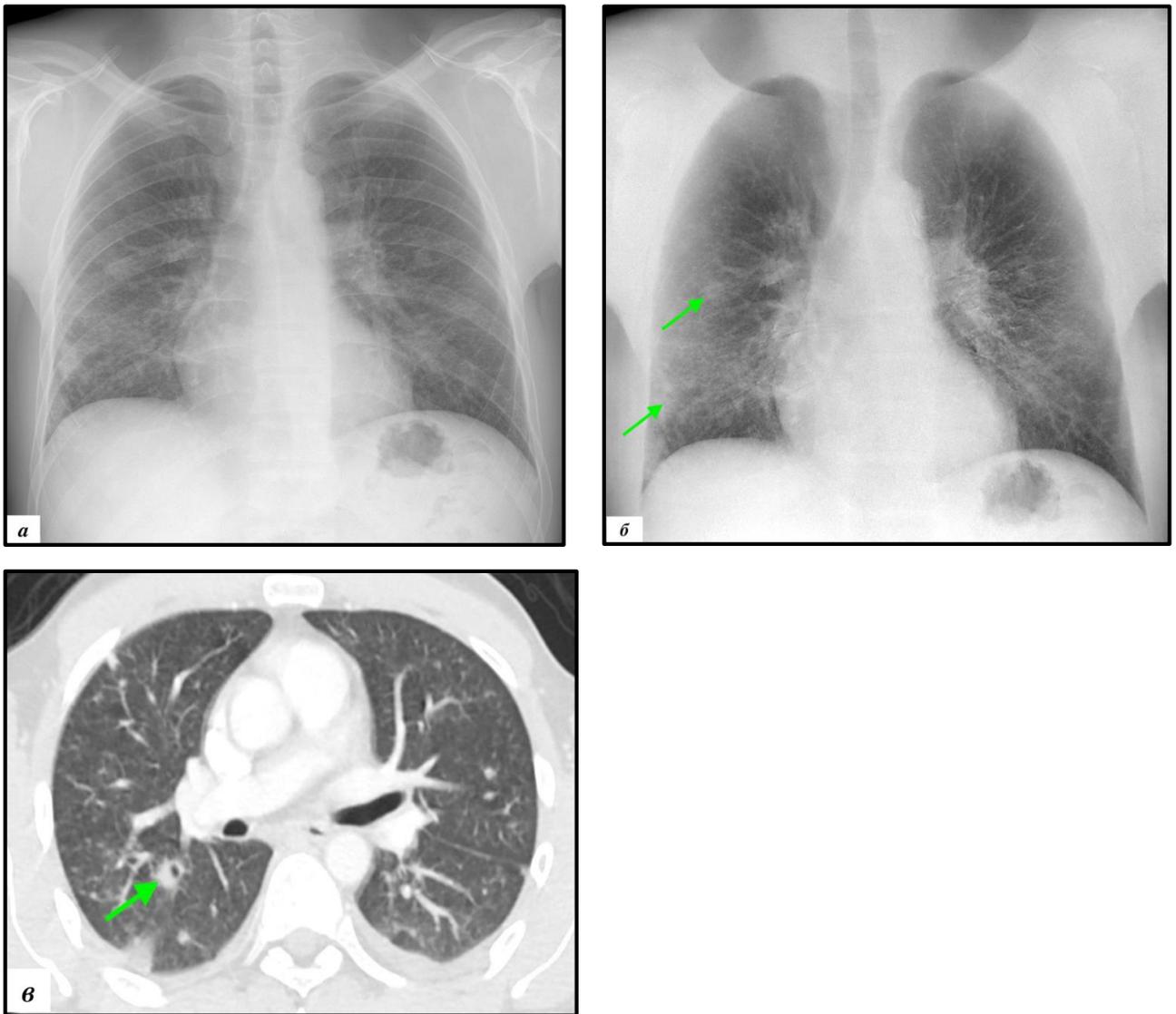


Рисунок 19 – Данные лучевого обследования пациента с септической пневмонией, вызванной *Escherichia coli*: *а* – стандартная рентгенограмма: в прикорневых и базальных отделах определяются участки уплотнения легочной ткани. Судить о наличии полостей распада в структуре затруднительно; *б* – РИМТ: четко визуализируется гетерогенная структура участков уплотнения, их кольцевидную форму; *в* – компьютерная томограмма (*легочное окно*): подтверждает наличие очаговых консолидации с мелкими полостями распада в структуре

Помимо этого, на РИМТ отмечался симптом ампутации бронха ($n = 1, 8,3 \%$), воздушной бронхографии ($n = 3, 25,0 \%$) и дисковидные ателектазы ($n = 2, 16,6 \%$). В остальных случаях ДЭР позволила более детально оценить основные характеристики участков затемнения легочного поля (интенсивность, контуры, структура инфильтрации, состояние легочного рисунка).

МСКТ проведена 12 пациентам. Инфильтративные изменения были подтверждены у 11 пациентов в данной группе. Однако в 4 (36,4 %) случаях дополнительно были определены участки уплотнения легочной ткани по типу «матового стекла», которые не визуализировались на стандартных и реконструированных изображениях даже ретроспективно. МСКТ позволила оценить сегментарную локализацию патологического процесса, структуру участков уплотнения в труднодоступных зонах для визуализации, например, за тенью сердца.

В общей выборке (n = 50) очаговые изменения и образования легких встречались в 22,0 % случаев. Преимущественно больные предъявляли жалобы на сухой и продуктивный кашель, одышку, боль в области грудной клетки. У 2 (18,2 %) пациентов выявленные изменения являлись случайной находкой (Таблица 11).

При объективном осмотре у 1 (9,0 %) обследуемого отмечался коробочный звук при перкуссии, в 6 (54,5 %) случаях выявлено изменение основного дыхательного шума, у 3 (27,3 %) пациентов выслушивались побочные дыхательные шумы. В крови у пациентов отмечалась лейкопения (n = 3, 27,3%) и лейкоцитоз (n = 2, 18,2%).

Таблица 11 – Частота выявленных симптомов в группе пациентов с очаговыми изменениями и образованиями легких

Наименование симптома	Количество пациентов	
	Абс., n	Отн., %
Сухой кашель	6	54,5
Одышка	6	54,5
Продуктивный кашель	4	36,4
Боль в области грудной клетки	3	27,3
Не связанные с дыхательной системой	2	18,2
Гипертермия	1	9,0

По данным ЦР всего было выявлено 18 образований. В подавляющем большинстве патологические изменения локализовались в верхней доле правого

легкого ($n = 8, 44,4\%$). По размеру и локализации выявленных легочных узелков и образований распределение было следующим (Рисунок 20). В $38,9\%$ случаев размеры находились в диапазоне значений от 11 до 15 мм. Контуры образований в 6 ($33,3\%$) случаях были неровные нечеткие, а в 12 ($66,7\%$) – ровные и четкие.

ДЭР позволила подтвердить наличие патологических изменений в 16 ($88,9\%$) случаях, в 2 ($11,1\%$) за образование были приняты остеохондрома ребра ($n = 1, 5,6\%$) и обызвествление первого ребра в месте перехода его в хрящевую часть ($n = 1, 5,6\%$) (Рисунок 21) [7].

В 5 ($27,8\%$) случаях на реконструированных изображениях отмечались признаки обызвествления очагов, которые не определялись на стандартных рентгенограммах.

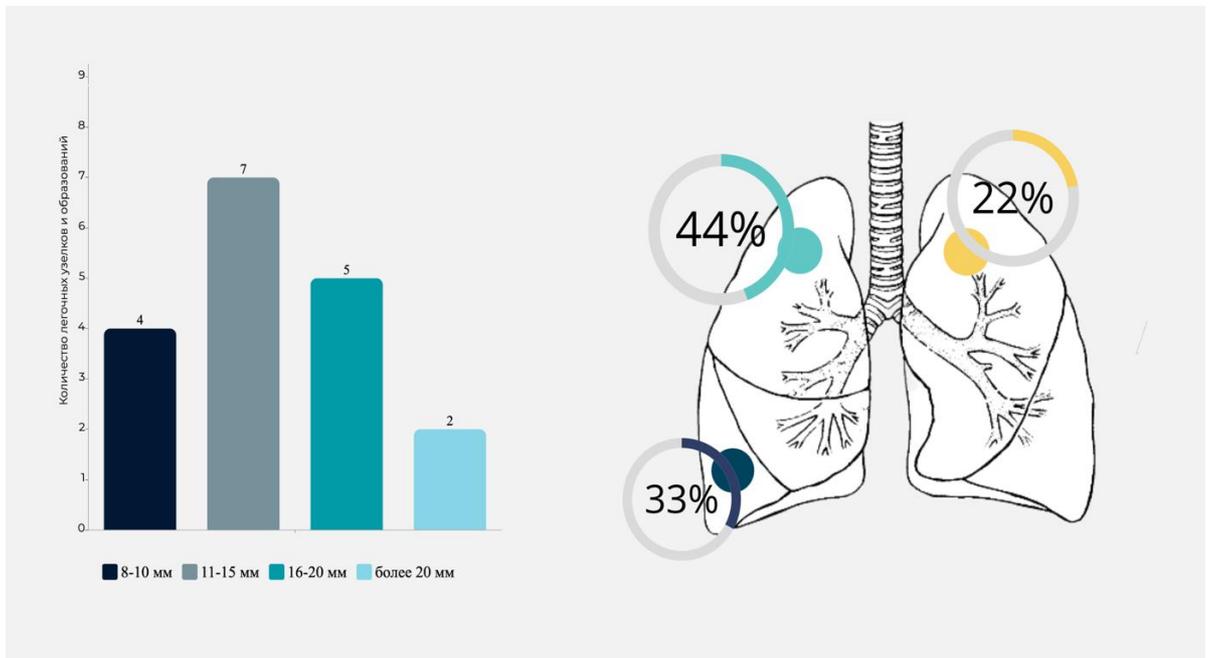


Рисунок 20 – Распределение выявленных легочных узелков и образований по размеру и локализации ($n = 18$)

При ДЭР по сравнению с цифровой рентгенографией дополнительно удалось выявить 4 очаговых образования размерами от 6 до 10 мм, локализованных в верхней доле правого легкого ($n = 3$) и верхней доле левого легкого ($n = 1$), перекрывающиеся тенью ключиц и лопаток (Рисунок 22) [7].

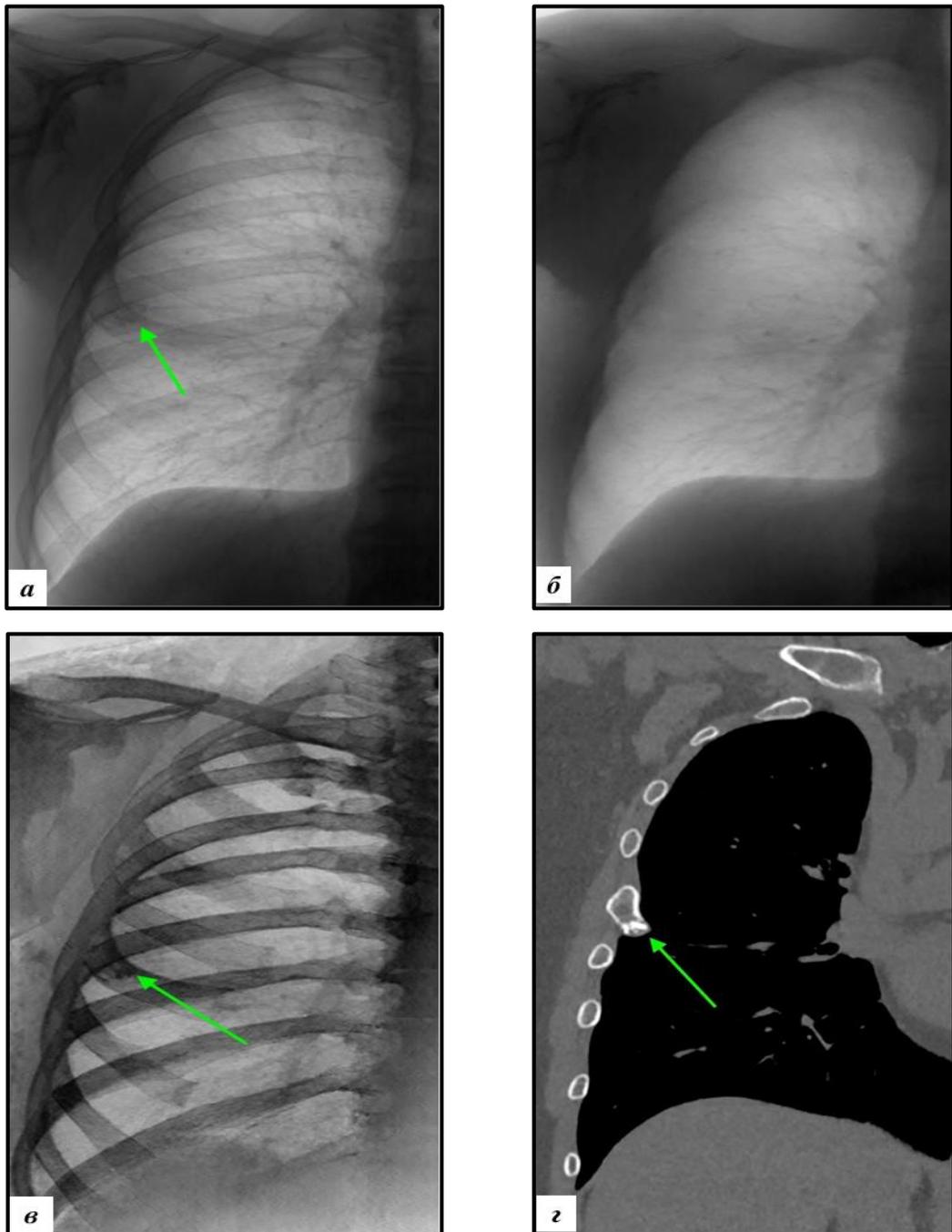


Рисунок 21 – Данные лучевого обследования: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – РИМТ; *в* – РИКТ; *г* – компьютерная томограмма (МПР, фронтальная плоскость, костное окно). На стандартной рентгенограмме в 4-м межреберье справа определяется очаг, субстратом которого является образование переднего отрезка 5-го ребра, наиболее вероятно остеохондрома (*стрелки*). Данное образование не определяется на мягкотканном изображении (*б*), при этом отчетливо прослеживается при выполнении костного режима (*в*). Выявленные изменения подтверждены по данным МСКТ (*г*)

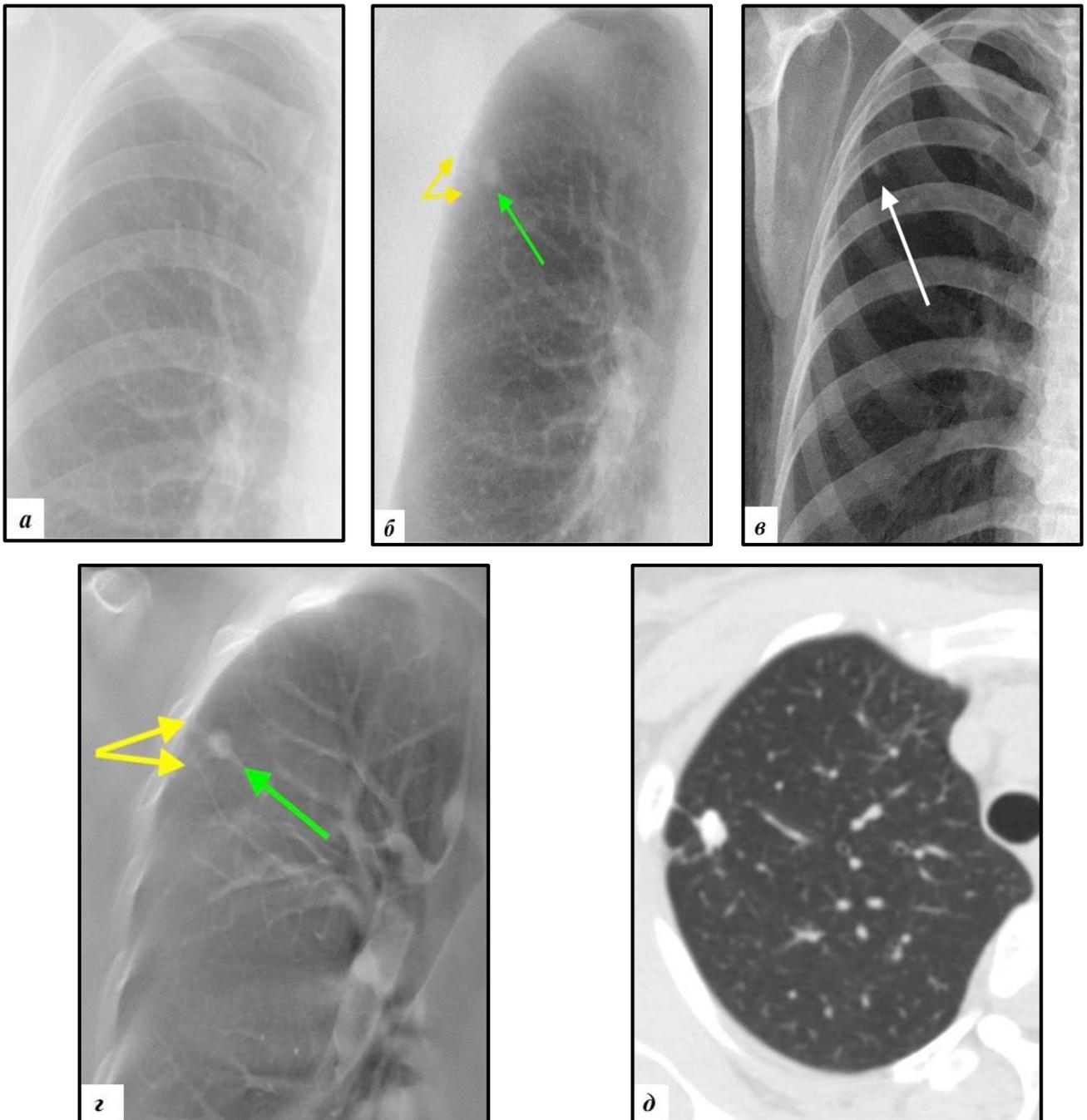


Рисунок 22 – Данные лучевого обследования: *a* – стандартная рентгенограмма: достоверно патологические изменения в правом легком не визуализируются; *б* – РИМТ: в верхней доле правого легкого определяется очаг средней интенсивности (*зеленая стрелка*) с тяжами, идущими к костальной плевре (*желтые стрелки*); *в* – РИКТ: в структуре очага дополнительно визуализируются кальцинированные участки (*белые стрелки*); *г* – томограмма (ТС): подтверждаются выявленные изменения; *д* – компьютерная томограмма (легочное окно): в верхушечном сегменте (S1) правого легкого кальцинированный очаг диаметром до 9 мм

Для уточнения характера выявленных изменений всем пациентам ($n = 11$) в данной группе была выполнена МСКТ органов грудной клетки. В 2 (18,2 %) случаях наличие легочных узелков не было подтверждено, что связано недостаточным подавлением элементов костной плотности на РИМТ. Дополнительно определялось еще 5 очагов размерами до 6 мм, которые не визуализировались ни при ЦР, ни при ДЭР. В остальных случаях МСКТ позволила оценить сегментарную локализацию патологических изменений, определить истинные размеры выявленных образований.

В группу пациентов с признаками деструкции легочной ткани по данным ЦР были включены 7 (14,0 %) человек. В большинстве случаев больные предъявляли жалобы на слабость, повышение температуры, одышку в покое, боль в области грудной клетки, продуктивный кашель, похудание и потливость (Таблица 12).

Таблица 12 – **Частота выявленных симптомов в группе пациентов с деструкцией легочной ткани**

Наименование симптома	Количество пациентов	
	Абс., n	Отн., %
Слабость	7	100
Гипертермия	7	100
Одышка	6	85,7
Боль в области грудной клетки	5	71,4
Продуктивный кашель	5	71,4
Потеря массы тела	3	42,9
Потливость	2	28,6

При объективном осмотре у 6 (85,7 %) пациентов отмечалось изменение перкуторного звука, при аускультации у всех обследуемых ($n = 7$) в данной подгруппе выслушивалось жесткое дыхание, побочные дыхательные шумы различного характера. В 3 (42,9 %) случаях выявлены участки «немного легкого».

У подавляющего большинства пациентов в крови отмечался лейкоцитоз ($n = 6, 85,7\%$), повышение СОЭ ($n = 6, 85,7\%$) и анемия ($n = 5, 71,4 \%$).

По данным ЦР участки деструкции легочной ткани локализовались преимущественно в нижних отделах обоих легких ($n = 5, 71,4 \%$). Чаще всего на рентгенограммах визуализировалось более трех полостей распада ($n = 4, 57,1\%$) размерами от 8 до 94 мм.

ДЭР позволила подтвердить наличие участков деструкции легочной ткани во всех случаях ($n = 7, 100 \%$), при этом у 3 (42,9 %) пациентов на реконструированных изображениях визуально определялось большее количество полостей распада, чем на стандартных рентгенограммах. При анализе РИМТ более детально визуализировались стенки полостей, наличие внутриполостного содержимого (Рисунок 23). У 2 (28,6 %) пациентов при ДЭР дополнительно были выявлены очаги, которые не определялись на стандартных рентгенограммах [7].

Всем пациентам ($n = 7$) в данной группе была выполнена МСКТ органов грудной клетки. Во всех случаях наличие полостей деструкции легочной ткани было подтверждено. При МСКТ дополнительно выявлялись участки уплотнения легочной ткани по типу консолидации в наддиафрагмальных отделах ($n = 1, 14,3 \%$), по типу «матового стекла» ($n = 3, 42,9 \%$), очаги ($n = 3, 42,9 \%$), признаки центрилобулярной и парасептальной эмфиземы ($n = 2, 28,6 \%$) [7].

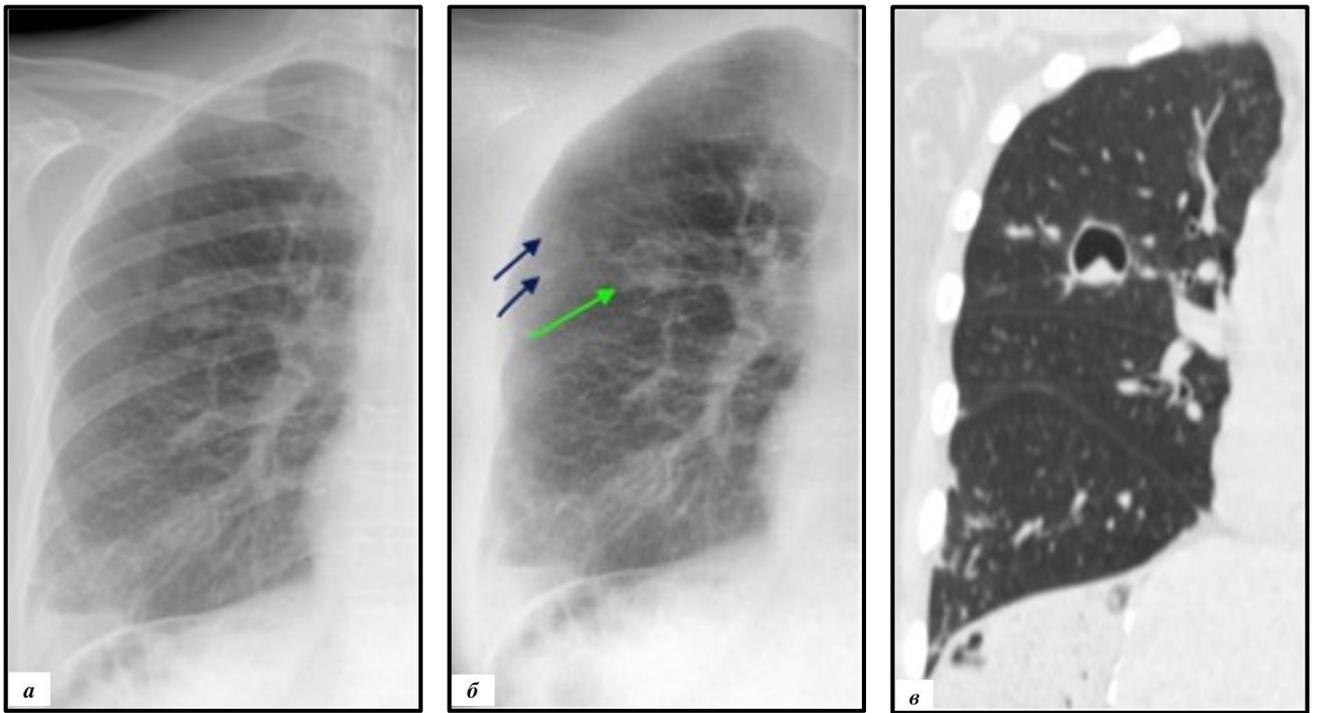


Рисунок 23 – Данные лучевого обследования пациента с полисегментарной деструктивной пневмонией, вызванной *Acinetobacter baumannii*: *а* – стандартная рентгенограмма: в правом легком множественные полости деструкции; *б* – РИМТ: более четко визуализируются границы полостных образований, наличие пристеночного утолщения (*зеленая стрелка*), очаговые изменения в окружающей легочной паренхиме (*синие стрелки*); *в* – компьютерная томограмма (МПП, фронтальная плоскость, легочное окно) подтверждает выявленные изменения

Для сравнения информативности цифровой рентгенографии и ДЭР была определена диагностическая эффективность изучаемых методик в определении основных рентгенологических признаков при легочной патологии (Таблица 13). При оценке полученных данных отмечается, что показатели чувствительности, специфичности, точности, прогностической ценности положительных и отрицательных результатов у ДЭР превосходили таковые у ЦР (Рисунок 24). Различия показателей чувствительности оказались статистически значимы, поскольку 95 % доверительные интервалы для чувствительности обоих методов не перекрываются [7; 8].

Таблица 13 – Диагностическая эффективность ЦР и ДЭР в диагностике заболеваний легких (n = 50)

Методика исследования	Число больных в группах в зависимости от характера заключения				Показатели информативности диагностических методик, %				
	И П	Л П	Л О	И О	Чувствительность	Специфичность	Точность	Прогностическая ценность положительных результатов	Прогностическая ценность отрицательных результатов
ЦР	19	6	11	14	63,3 [50,4–71,6]	70,0 [50,5–85,4]	66,0 [50,4–78,4]	76,0 [60,4–88,4]	56,0 [40,4–68,4]
ДЭР	25	2	5	18	83,3 [72,5–88,7]	90,0 [72,0–98,1]	86,0 [71,8–92,5]	92,6 [79,4–98,6]	78,3 [62,8–85,3]

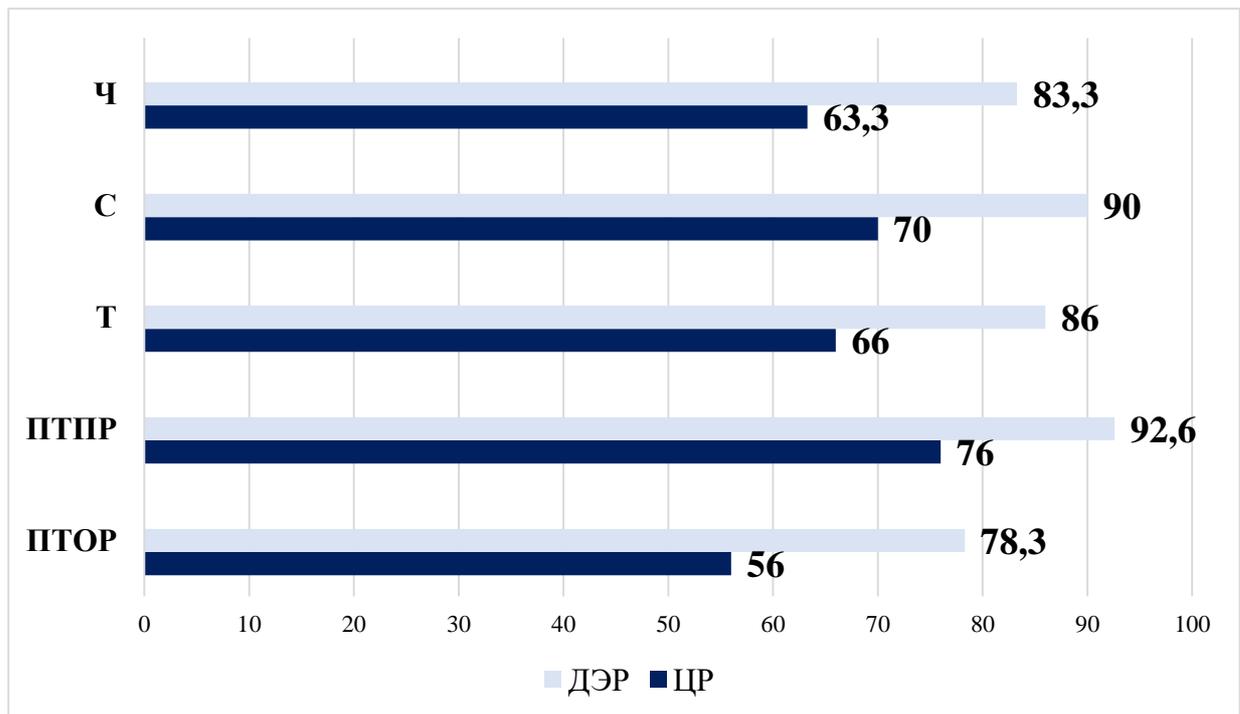


Рисунок 24 – Диагностическая эффективность ЦР и ДЭР в определении основных рентгенологических признаков при легочной патологии (n = 50)

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение ДЭР позволит значительно повысить показатели чувствительности в выявлении

очаговых и инфильтративных изменений, полостных образований легких, что может способствовать увеличению шансов пациентов на благоприятный прогноз.

С целью демонстрации возможностей мягкой тканной реконструкции ДЭР приводим клинический пример.

Мужчина К., 67 лет, с жалобами на общую слабость, кашель с отделением светлой мокроты в течение месяца. В анамнезе курение с 16 лет (индекс курильщика 17 пачка/лет).

Сопутствующая патология: артериальная гипертензия 3-й степени, Ишемическая болезнь сердца. Острое нарушение мозгового кровообращения (2015 г.).

Объективный осмотр: температура тела – 36,8 °С, сатурация – 97 %, ЧДД – 17. При перкуссии – легочный звук с двух сторон. При аускультации – везикулярное дыхание с двух сторон, единичные сухие хрипы.

Общий клинический анализ крови: эритроциты – $5,3 \times 10^{12}/л$, гемоглобин – 156 г/л, гематокрит – 47 %, тромбоциты – $292 \times 10^9/л$, лейкоциты – $12 \times 10^9/л$, сегментоядерные гранулоциты – 55 %, лимфоциты – 35 %, эозинофилы – 1 %, моноциты – 10 %, СОЭ – 20 мм/ч.

Биохимический анализ крови: общий белок – 63 г/л, аланинаминотрансфераза (АЛТ) – 29 ед/л, аспартатаминотрансфераза (АСТ) – 15 ед/л, общий билирубин – 16 мкмоль/л, мочевины – 8,3 ммоль/л, креатинин – 89 мкмоль/л, холестерин – 5,6 ммоль/л, глюкоза – 5,1 ммоль/л.

Рентгенография органов грудной клетки в прямой проекции: рентгенологическая картина образования нижней доли правого легкого (Рисунок 25).

МСКТ органов грудной клетки с контрастным усилением: КТ-картина образования в латеральном сегменте (S9) правого легкого.

При последующем гистологическом исследовании верифицирована аденокарцинома.



Рисунок 25 – Данные лучевого обследования пациента: *а* – стандартная рентгенограмма: достоверно патологические изменения в правом легком не визуализируются; *б* – РИМТ: в нижней доле правого легкого определяется образование с нечеткими неровными контурами, при ретроспективном анализе стандартной рентгенограммы (*а*) в указанной зоне легочный рисунок деформирован, перекрывается задним отрезком 10-го ребра; *в* – компьютерная томограмма (легочное окно) – в латеральном базальном сегменте (S9) правого легкого образование диаметром до 28 мм

На данном клиническом примере продемонстрировано, что применение ДЭР позволяет улучшить визуализацию образований легких, что способствует

повышению их выявляемости на первом этапе диагностического поиска, а также уменьшению количества ложноотрицательных результатов.

5.2. Оценка эффективности применения ДЭР в сравнении с ЦР в диагностике патологии костных структур

В общей группе пациентов переломы ребер встречались в 9 (18,0 %) случаях. Только у 2 (22,2 %) больных клиническая картина, характерная для повреждения скелета грудной клетки, была ярко выражена, в остальных случаях ($n = 7$, 77,8 %) выявленные изменения являлись случайной находкой. Преимущественно больные предъявляли жалобы на слабость, одышку и сухой кашель (Таблица 14).

Таблица 14 – Частота выявленных симптомов в группе пациентов с переломами ребер

Наименование симптома	Количество пациентов	
	Абс., n	Отн., %
Слабость	5	55,6
Одышка	4	44,4
Сухой кашель	3	33,3
Боль в области грудной клетки	2	22,2
Не связанные с дыхательной системой	1	11,1

При объективном осмотре данной группы изменение перкуторного звука выявлено у 2 (22,2 %) больных, у 3 (33,3 %) пациентов отмечалось жесткое дыхание, а в 5 (55,6 %) случаях выслушивались сухие и влажные хрипы. В крови определялся лейкоцитоз ($n = 2$, 22,2 %) и эозинофилия ($n = 1$, 11,1%).

При анализе полученных рентгенограмм у 4 (44,4 %) пациентов визуализировались переломы ребер без признаков консолидации, в остальных случаях ($n = 5$, 55,6 %) – консолидированные переломы. Преимущественно ($n = 6$, 66,7 %) повреждения располагались с двух сторон по подмышечным линиям. Дополнительно у 2 (22,2 %) пациентов на рентгенограммах определялись признаки малого гидроторакса.

При анализе РИКТ в 2 (11,1 %) случаях дополнительно были выявлены переломы ребер без признаков консолидации, расположенные по подмышечным линиям, которые не визуализировались на стандартных рентгенограммах (Рисунок 26). У 1 пациента на реконструированном изображении определялся участок вздутия ребра, который на нативном изображении был ошибочно интерпретирован как консолидированный перелом (рисунок 30) [7].

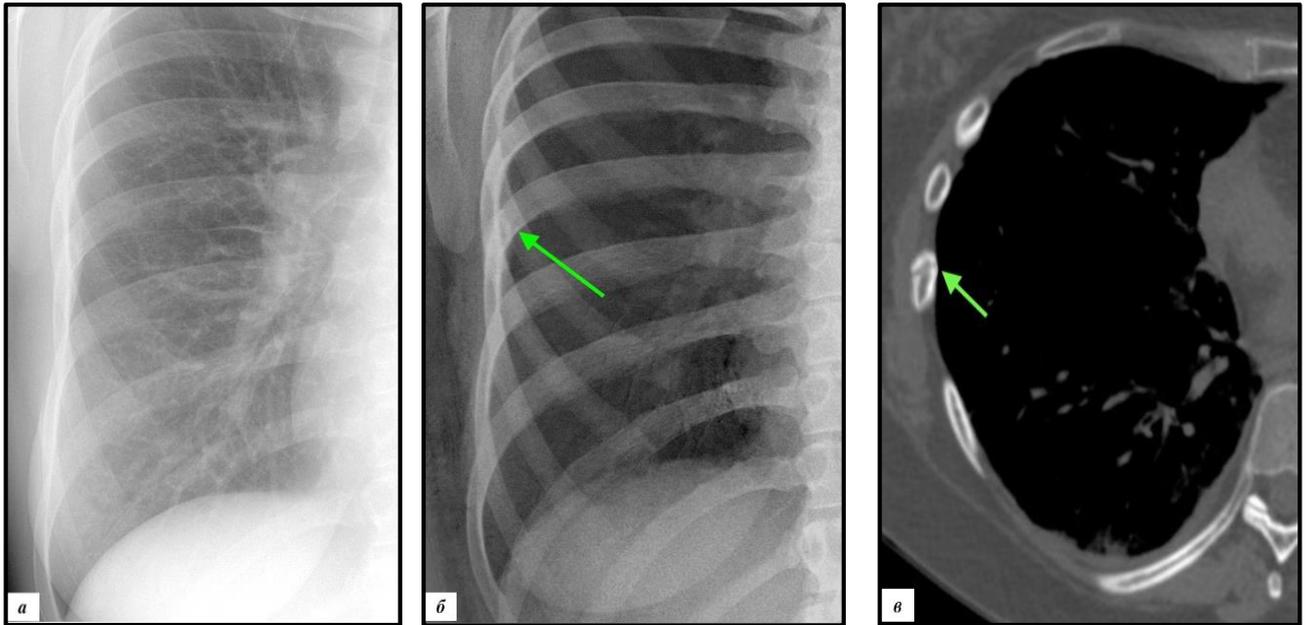


Рисунок 26 – Рентгенограммы органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма: патологические изменения не определяются; *б* – РИКТ: по средней подмышечной линии визуализируется перелом 7-го ребра без признаков консолидации (*стрелка*); *в* – компьютерная томограмма (костное окно): подтверждается наличие перелома бокового отрезка 7-го ребра справа

В остальных случаях применение ДЭР позволило четко визуализировать линии переломов в зонах краевого снижения пространственного разрешения, оценить структуру ребер даже на фоне субтотального затемнения легочного поля, что крайне затруднительно при анализе стандартных рентгенограмм без выполнения дополнительных проекций.

В данной группе МСКТ органов грудной клетки выполнено 9 пациентам. В одном случае дополнительно был выявлен неконсолидированный перелом поперечного отростка позвонка Th12.

В общей группе пациентов изменение структуры костной ткани в виде очагов деструкции были определены в 11 (22,0 %) случаях. В данную подгруппу входили больные с уже верифицированным диагнозом плазмоклеточной миеломы по данным цитоморфологического исследования костного мозга (выявление в пунктате красного костного мозга более 10 % клональных плазматических клеток) и с выраженными проявлениями остеодеструктивного синдрома. Преимущественно больные предъявляли жалобы на слабость, боль в различных частях скелета, скованность движений, потливость и потерю массы тела более 9 кг (Таблица 15).

Таблица 15 – **Частота выявленных симптомов в группе пациентов с очагами деструкции костной ткани**

Наименование симптома	Количество пациентов	
	Абс., n	Отн., %
Слабость	11	100
Не связанные с дыхательной системой	8	72,7
Потливость	5	45,5
Потеря массы тела	3	27,3
Одышка	3	27,3

При объективном осмотре у 8 (72,7 %) пациентов отмечалось изменение основного дыхательного шума, в 4 (36,4 %) случаях выслушивались единичные рассеянные сухие хрипы. В крови анемия была выявлена у 9 (81,8 %) пациентов, лейкопения – у 5 (45,5 %), увеличение СОЭ – у 4 (36,4 %), тромбоцитопения – у 2 (18,2 %), гиперпротеинемия – у 7 (63,6 %), гиперкальциемия – у 3 (27,3 %).

Суточная протеинурия определялась в 3 (27,3 %) случаях, белок Бенс-Джонса в моче выявлен у 2 (18,2 %) пациентов.

По данным ЦР органов грудной клетки патологические переломы ребер визуализировались в 4 (36,4 %) случаях, ключицы – в 1 (9,1 %), очаги деструкции костной ткани достоверно определялись только у 5 (45,5 %) пациентов.

Применение ДЭР позволило получить новую информацию в виде визуализации очагов деструкции в ребрах, ключицах, лопатках, проксимальных отделах плечевых костей у 6 (54,5 %) больных. В 2 (18,2 %) случаях дополнительно определялись патологические переломы ребер (Рисунок 27). Рентгенологическая картина миеломного поражения в подавляющем большинстве случаев выражалась в наличии диффузного разрежения костной ткани, что крайне затрудняло визуализацию очагов деструкции особенно на фоне усиленного обогащенного легочного рисунка, участков затемнений легочного поля (Рисунок 28) [7].

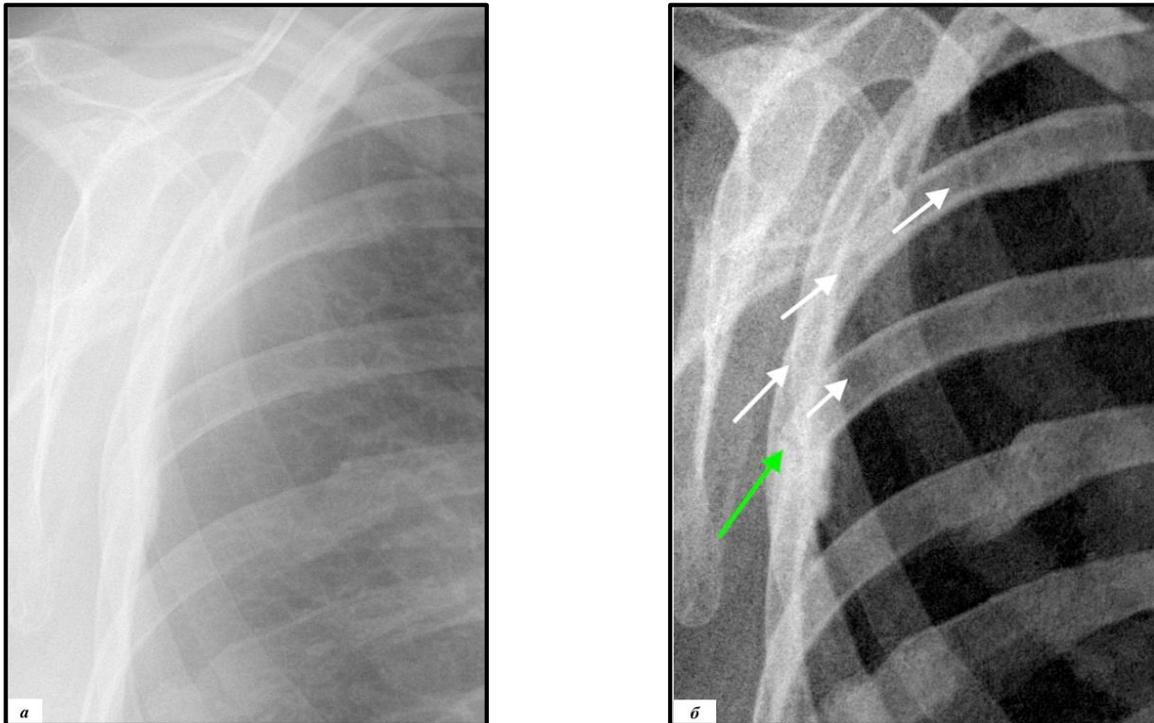


Рисунок 27 – Рентгенограммы органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – РИКТ. На реконструированном изображении на фоне костной мозоли 7-го ребра четко визуализируется линия перелома вышележащего ребра (зеленая стрелка). Дополнительно в структуре ребер определяются множественные очаги деструкции (белые стрелки), которые не визуализируются на стандартной рентгенограмме даже ретроспективно

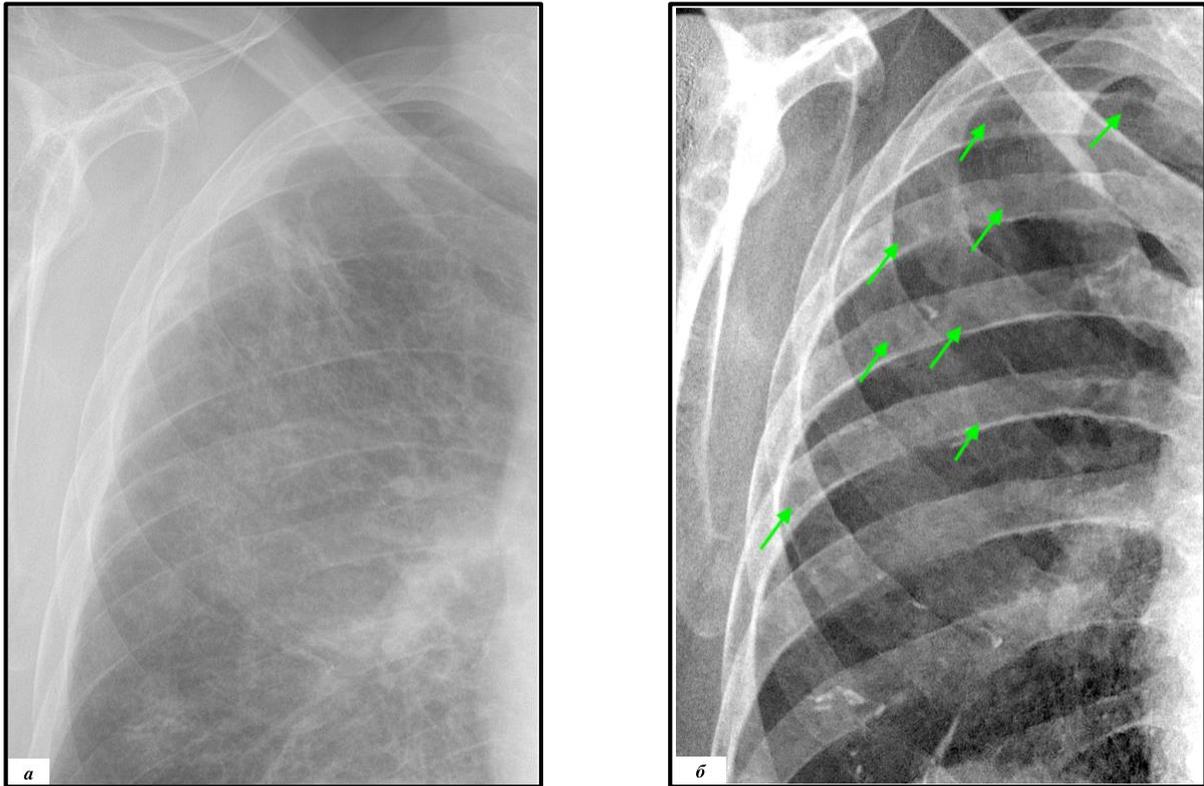


Рисунок 28 – Рентгенограммы органов грудной клетки в прямой проекции: *а* – стандартная рентгенограмма; *б* – РИКТ. На стандартной рентгенограмме на фоне гетерогенного снижения прозрачности легочных полей за счет выраженного интерстициального компонента легочного рисунка изменения достоверно не определяются. На РИКТ отчетливо визуализируются множественные очаговые деструкции в ребрах (*стрелки*)

При анализе РИКТ удалось уточнить характер выявленных очагов деструкции, которые в подавляющем большинстве случаев были округлой формы, с четкими контурами, размерами от 3 до 15 мм, не склонные к слиянию.

МСКТ органов грудной клетки в рамках комплексного лучевого обследования было выполнено 6 (54,5 %) пациентам. В 3 (27,3 %) случаях в ребрах дополнительно визуализировались очаги деструкции размерами до 3 мм. У 5 (45,5 %) больных определены патологические компрессионные переломы тел позвонков. В 3 (27,3 %) случаях очаги деструкции костной ткани, локализованные в лопатке ($n = 2$), дистальном отделе ключицы ($n = 1$), выявленные по данным ДЭР, не были подтверждены [7].

Для сравнения информативности ЦР и ДЭР была определена диагностическая эффективность изучаемых методик в определении основных рентгенологических признаков при патологии костной ткани (Таблица 16). При сравнительном анализе чувствительность и прогностическая ценность отрицательных результатов ДЭР (85,0 и 90,0 % соответственно) статистически значимо ($p < 0,05$) превысили показатели ЦР (45,0 и 71,8 % соответственно). Специфичность исследуемой методики оказалась ниже результатов цифровой рентгенографии 90,0 % в сравнении с 93,3 %, однако показатели были статистически незначимы ($p > 0,05$) (Рисунок 29) [7; 8].

Таблица 16 – Диагностическая эффективность ЦР и ДЭР в диагностике патологии костных структур грудной клетки ($n = 50$)

Методика исследования	Число больных в группах в зависимости от характера заключения				Показатели информативности диагностических методик, %				
	ИП	ЛП	ЛО	ИО	Чувствительность	Специфичность	Точность	Прогностическая ценность положительных результатов	Прогностическая ценность отрицательных результатов
ЦР	9	2	11	28	45,0 [28,3–53,2]	93,3 [82,9–98,8]	74,0 [60,6–80,5]	81,8 [51,4–96,7]	71,8 [63,2–76,0]
ДЭР	17	3	3	27	85,0 [67,4–94,6]	90,0 [78,3–96,4]	88,0 [74,6–95,6]	85,0 [67,4–94,6]	90,0 [78,3–96,4]

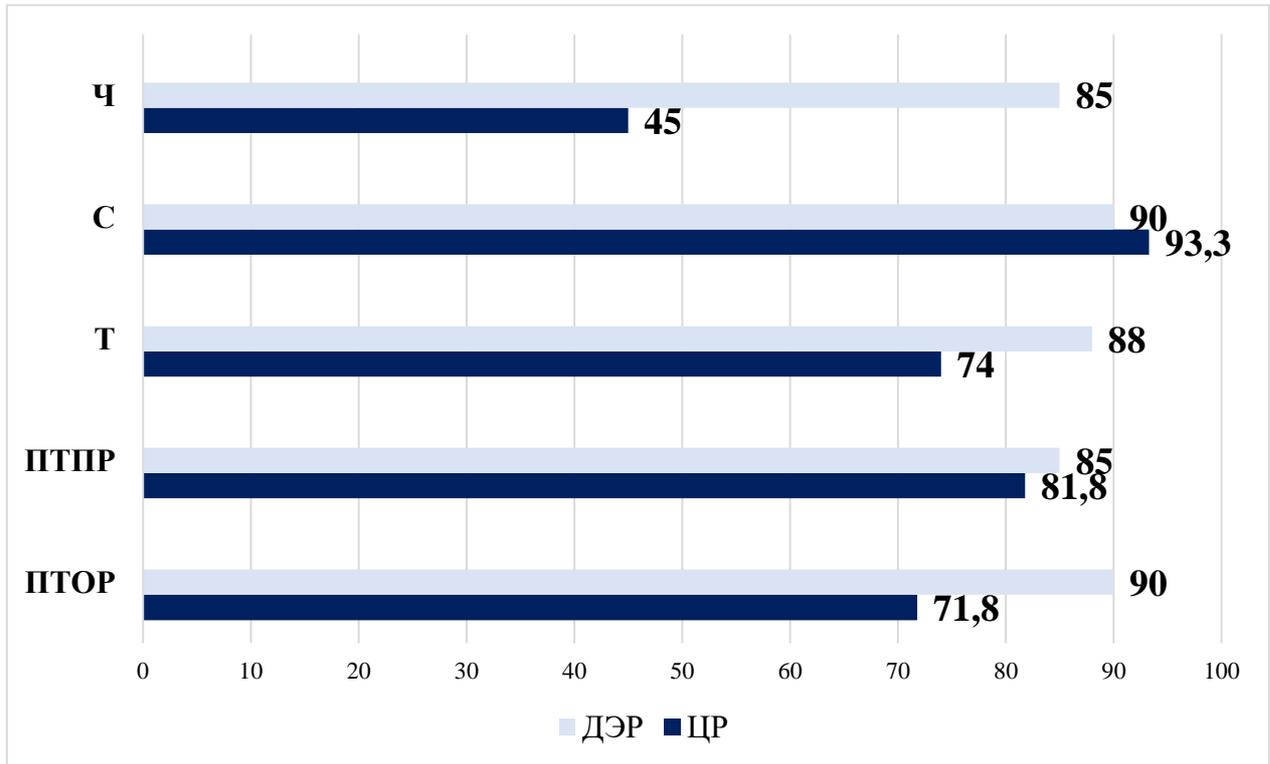


Рисунок 29 – Диагностическая эффективность ЦР и ДЭР в определении основных рентгенологических признаков при патологии костной ткани (n = 50)

Представленные данные демонстрируют эффективность применения ДЭР в определении переломов ребер, как «свежих», так и консолидированных, а также в выявлении и динамической оценке литических очагов деструкции скелета грудной клетки и плечевого пояса.

Таким образом, ДЭР расширяет возможности рентгенологического метода исследования органов грудной клетки. Показано, что ДЭР превосходит ЦР в выявлении многих рентгенологических симптомов, особенно при костной патологии, и может использоваться на первом этапе диагностического поиска, заменив цифровую рентгенографию, для более уверенного выявления патологических процессов в легочной ткани и костных структурах грудной клетки. Данная методика не рассматривается как альтернатива томосинтезу или МСКТ, но в некоторых случаях может исключить необходимость в проведении исследований томографическими методиками, тем самым снизить нагрузку на врачей кабинетов компьютерной томографии.

В качестве демонстрации возможностей ДЭР приводим клиническое наблюдение.

Пациент П., 73 года, с жалобами на постоянные умеренные боли в шейном отделе позвоночника, скованность в мышцах шеи, общую слабость.

Объективный осмотр: общее состояние – средней степени тяжести. Сознание ясное. Кожные покровы и видимые слизистые – обычной окраски. Температура тела – 36,6 °С, сатурация – 98 %, ЧДД – 16. Отмечается умеренно болезненная пальпация в паравертебральных зонах в грудном отделе позвоночника.

Общий клинический анализ крови: эритроциты – $5,42 \times 10^{12}/л$, гемоглобин – 116 г/л, тромбоциты – $254 \times 10^9/л$, лейкоциты – $11,8 \times 10^9/л$, сегментоядерные гранулоциты – 82 %, лимфоциты – 12 %, моноциты – 3 %, СОЭ – 67 мм/ч.

Биохимический анализ крови: общий белок – 90 г/л, альбумин – 43 г/л, АЛТ – 13 ед/л, АСТ – 15 ед/л, мочевины – 9 ммоль/л, креатинин – 87 мкмоль/л, СРБ – 2 мг/л, кальций – 2,43 ммоль/л.

Рентгенография органов грудной клетки в прямой проекции: участок вздутия 8-го ребра справа (Рисунок 30). Указанные изменения ранее были интерпретированы как консолидированный перелом.

МСКТ шейного отдела позвоночника и органов грудной клетки с контрастным усилением: отмечается вздутие и истончение кортикального слоя с фрагментарной визуализацией последнего в структуре левого мыщелка затылочной кости, в правой лопатке, задних отрезках 3-го и 5-го ребер слева и 8-го ребра справа (Рисунок 30).

Иммунохимическое исследование крови: Ig Gk – 14,6 г/л.

Миелограмма: количество плазматических клеток резко превышает норму – 11,5 %.

Биопсия образования 8-го ребра справа: пласты клеток опухоли солидного строения с эозинофильной цитоплазмой и мономорфными круглыми гиперхромными ядрами – плазмоцитома.

Заключительный клинический диагноз: множественная миелома, III а стадия, G каппа. Генерализованный остеодеструктивный синдром с поражением шейных позвонков, затылочной кости, правой лопатки, плечевых костей, ребер с двух сторон. Плазмоцитома 8-го ребра справа. Хронический болевой синдром.

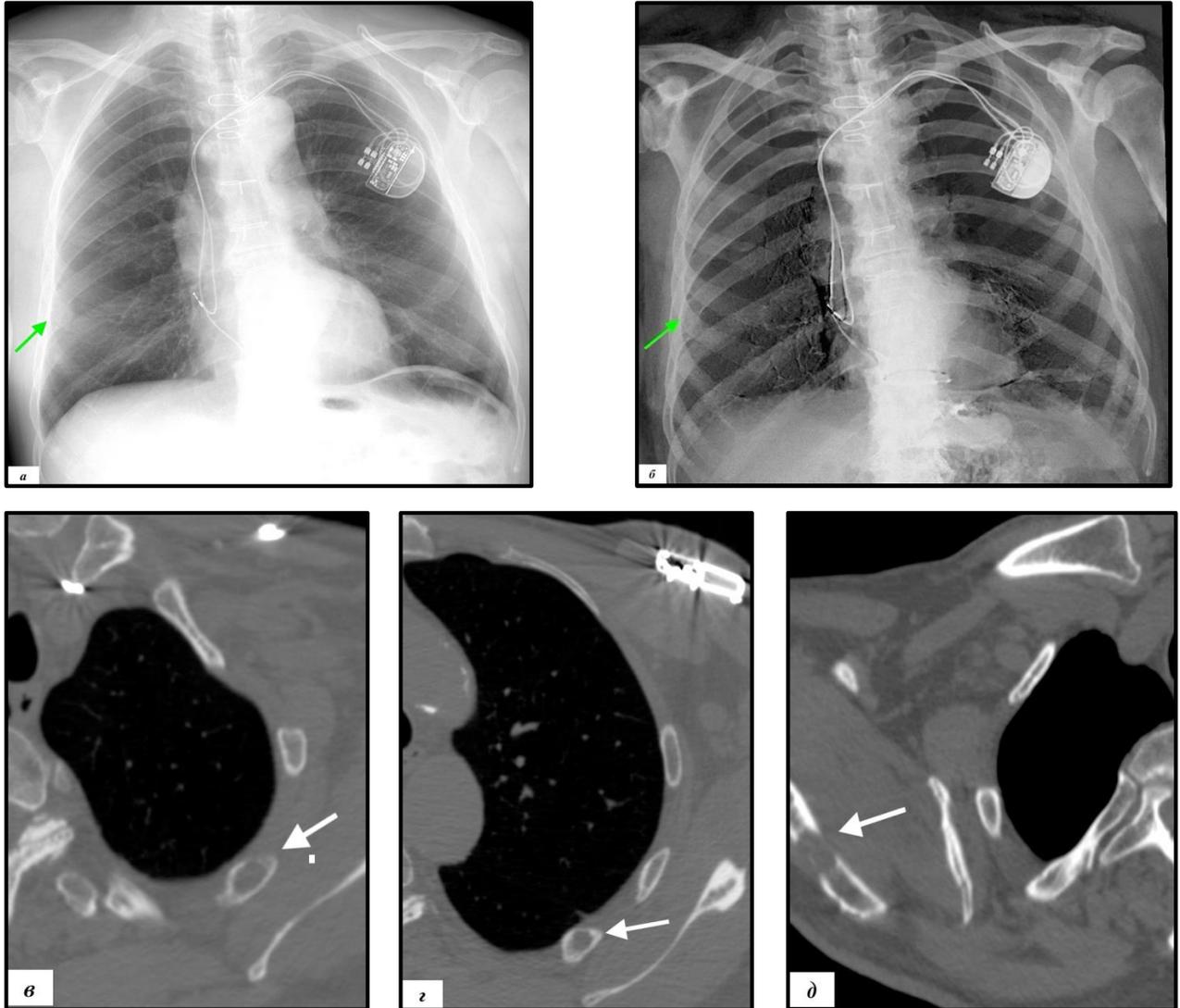


Рисунок 30 – Данные лучевого обследования пациента П.: *а* – стандартная рентгенограмма: изменения в 8-м ребре справа описаны как консолидированный перелом; *б* – РИКТ: в структуре 8-го ребра справа четко прослеживается участок разрежения костной ткани, кортикальный слой на этом уровне истончен (*зеленая стрелка*). При ретроспективном анализе стандартной рентгенограммы оценка структуры 8-го ребра затруднена; *в, г, д* – компьютерные томограммы (костное окно): дополнительно визуализируются очаговые деструкции в задних отрезках 3-го и 5-го ребер слева, в правой лопатке (*белые стрелки*)

Таким образом, данный клинический случай демонстрирует эффективность ДЭР в выявлении литических очагов деструкции скелета грудной клетки и плечевого пояса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Болезни дыхательной системы занимают одно из главных мест в структуре заболеваемости и смертности во всем мире [14].

Патология органов дыхания объединяет широкий спектр различных по этиологии и патогенезу заболеваний с разнообразной клинической картиной. Еще в 2000 г. в докладе ВОЗ были выделены нозологии, такие как инфекционные заболевания дыхательных путей, рак легкого, туберкулез, которые являются основными причинами смертности и инвалидизации широких групп населения [85]. Данные, представленные экспертами ВОЗ, актуальны и в наше время.

В России, по данным за 2022 г., зарегистрирован 44 981 впервые выявленный случай злокачественных новообразований трахеи, бронхов и легких, при этом показатель запущенности составил 42,2 %. Онкологические процессы указанных локализаций занимают первые места в структуре смертности от злокачественных новообразований среди мужского населения в возрасте от 40 лет [49].

До 2019 г. в РФ отмечалось улучшение эпидемической ситуации по туберкулезу [40]. Однако пандемия COVID-19 привела к потере стабильной динамики заболеваемости туберкулезом на территории РФ, что прежде всего связано со снижением охвата населения периодическими осмотрами в связи с введением ограничительных мер. В настоящее время такие проблемы, как увеличение частоты распространенности деструктивных форм туберкулеза, увеличение количества пациентов с широкой лекарственной устойчивостью микобактерий и коморбидных состояний, имеют высокую актуальность для практического здравоохранения [46].

Ведущая роль в диагностике патологий дыхательной системы отведена лучевым методам обследования. Несомненно, на сегодняшний день стандартная рентгенография остается наиболее широко применяемой методикой обследования органов грудной клетки на первом этапе диагностического поиска. К главным преимуществам рентгенографии можно отнести доступность, быстроту выполнения исследований, сравнительно небольшую стоимость и низкую лучевую нагрузку [49]. Основным ограничением данной методики, а точнее ее физической

особенностью, является суммационный эффект, который в ряде случаев не позволяет достоверно судить о выявленных изменениях.

Компьютерная томография, способная решить данную проблему, относится к дорогостоящим методам с высоким уровнем лучевой нагрузки. В связи с этим до настоящего времени актуальным остается поиск новых рентгенологических методик, позволяющих усовершенствовать диагностический процесс без послойного исследования.

Развитие цифровых технологий позволило возобновить интерес к методике ДЭР, позволяющей уменьшить влияние суммационного эффекта за счет выполнения экспозиции при высоком и низком анодных напряжениях на трубке и построения на их основе реконструированных изображений тканей, имеющих разные коэффициенты ослабления [25, 27].

Целью данного исследования было улучшение лучевой диагностики заболеваний органов грудной клетки за счет применения методики двухэнергетической рентгенографии.

Для достижения обозначенной цели были определены следующие задачи:

1. Провести экспериментальное исследование возможностей и ограничений двухэнергетической рентгенографии с использованием специально разработанного тест-объекта, с целью дальнейшего внедрения методики в клиническую практику, отработав физико-технические параметры съемки для рентгеновских аппаратов отечественного производства.
2. Оценить роль двухэнергетической рентгенографии в скрининговых исследованиях и её значимость в диагностическом процессе.
3. Выполнить сравнительный анализ эффективности двухэнергетической рентгенографии со стандартной методикой и мультисрезовой компьютерной томографии.
4. Определить место двухэнергетической рентгенографии в алгоритме лучевой диагностики болезней органов дыхания.

Для достижения поставленной цели выполнено экспериментальное исследование, в процессе которого был создан тест-объект. Тест-объект состоял из семи шейных позвонков, структур, имитирующих трахею, главные бронхи, позвоночные артерии с наличием кальцинированных бляшек. Возможности ДЭР в визуализации тканей различной плотности определялись при сравнительном анализе серий изображений, полученных на рентгеновском аппарате «УниКоРД-МТ» (АО «МТЛ», Россия) и на цифровой системе «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония). В результате наиболее эффективное разделение структур тест-объекта различной плотности было достигнуто только на цифровой диагностической системе «Amulet Innovality» (Fujifilm Medical System, Япония) с плоскопанельным детектором высокого разрешения. Наибольшие трудности при работе с детектором стационарных рентгеновских аппаратов возникали при получении РИКТ, что связано с наличием выраженных артефактов «зернистости», ограничивающих применение методики на клинических этапах. По результатам проведенного экспериментального исследования сформулированы предварительные рекомендации по получению реконструированных изображений оптимального качества для рентгеновских аппаратов отечественного производителя.

Далее проводилось клиническое исследование, которое проходило в два этапа.

На первом этапе выполнялось лучевое обследование 252 пациентов (133 мужчины и 119 женщин, средний возраст 60 лет, Q_1 – Q_3 : 48–69 лет), выбранных в случайном порядке, проходивших обследование в рамках плановой диспансеризации или лечение в терапевтическом, хирургическом, кардиологическом, гастроэнтерологическом и гематологическом отделениях на базе многопрофильного стационара. В исследование были включены лица старше 18 лет, которые подписали добровольное информированное согласие. Добровольцы младше 18 лет, беременные, кормящие грудью, а также пациенты в тяжелом и крайне тяжелом состоянии не включались в работу.

В первой группе пациентов активные жалобы со стороны органов дыхания отсутствовали у 164 пациентов (65,0 %), отмечался продуктивный кашель у 11 пациентов (4,4 %), сухой кашель у 27 пациентов (10,7 %), нарастание выраженности одышки у 36 пациентов (14,2 %), боль в области грудной клетки у 14 пациентов (5,5 %).

Каждому больному выполнялась ДЭР органов грудной клетки в прямой проекции на рентгеновском аппарате «ТелеКоРД-МТ-Плюс» (АО «МТЛ», Россия). При проведении ДЭР использовались следующие физико-технические параметры, которые были постоянными на каждом этапе работы: напряжение на анодной трубке 60/120 кВ для астеников и нормостеников и 70/130 кВ для гиперстеников, фокусное расстояние – 180 см с наличием дополнительного фильтрующего слоя из 1 мм алюминия и 0,2 мм меди.

В исследовании приняли участие 5 врачей-рентгенологов, которые оценивали полученные рентгенограммы по шкале от -1 до 2 (таблица 5). Анализ изображений выполнялся в два этапа: на первом – интерпретация стандартных рентгенограмм с РИМТ, на втором – в совокупности с РИКТ.

Далее проводилась уточняющая диагностика в выборочной группе больных (n = 50) (27 мужчин и 23 женщины, средний возраст 64 года, Q₁–Q₃: 50–72 года), включающей пациентов с выявленными изменениями по данным цифровой рентгенографии органов грудной клетки.

Клинические методы исследования включали изучение жалоб, анамнеза настоящего заболевания и жизни пациента, объективные данные общего и физикального осмотров, а также показателей общего клинического и биохимического анализов крови. Также 13 больным (26,0 %) были проведены цитологическое и бактериологическое исследования мокроты. В 16,0 % случаев выполнялось цитоморфологическое исследование костного мозга. Основные жалобы, которые предъявляли пациенты в данной группе, были одышка (n = 22, 44,0 %), слабость (n = 32, 64,0 %), продуктивный кашель (n = 16, 32,0 %), гипертермия (n = 15, 30,0 %), сухой кашель (n = 13, 26,0 %), боль в области грудной

клетки ($n = 10, 20,0 \%$), потливость ($n = 10, 20,0 \%$), потеря массы тела ($n = 6, 12,0 \%$).

После проведения исследования анализ выполнялся в два этапа: на первом – интерпретация только стандартных рентгенограмм, на втором – в совокупности с реконструированными изображениями. В качестве референтного метода выступала МСКТ, которая проводилась в среднем на 3–4-е сутки после выполнения цифровой рентгенографии и ДЭР на аппарате Aquilion Prime 160 (Toshiba, Япония).

На первом этапе по данным анализа стандартных рентгенограмм, совмещенных с РИМТ, были выявлены следующие изменения: ателектаз, воспалительная инфильтрация, гидроторакс, изменение легочного рисунка, образования и очаговые изменения легких, деструкция легочной ткани, расширение тени средостения, релаксация купола диафрагмы, декстрапозиция органов средостения.

Мягкотканная реконструкция, по оценкам врачей-рентгенологов, позволила добиться улучшения визуализации анатомических и патологических структур, получить дополнительную информацию в 38 % случаев. Наиболее высокие результаты были получены при оценке экспертами очаговых изменений (средний балл – 1,0), образований легких (средний балл – 1,0), воспалительной инфильтрации (средний балл – 1,0). В связи с тем что полость деструкции легочной ткани была выявлена в 1 случае (средний балл – 2,0), достоверно судить о значимости данных результатов не представляется возможным. Коэффициент согласия между экспертами (каппа Флейса) по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИМТ составил 0,52, что соответствует умеренной степени согласия (общий процент согласия 64 %).

При интерпретации стандартных рентгенограмм, дополненных РИКТ, определялись следующие изменения: свежие и консолидированные переломы ребер, очаги деструкции ребер, ключиц, лопаток, проксимальных отделов плечевых костей, остеосклеротические очаги, кальцинированные атеросклеротические бляшки в стенках аорты, обызвествленные внутригрудные

лимфатические узлы, кальцинаты в паренхиме легких, медицинские инородные предметы.

Костная реконструкция позволила добиться улучшения визуализации анатомических и патологических структур, получить дополнительную информацию в 35 % случаев. Наиболее высокие результаты были получены при оценке экспертами консолидированных переломов ребер (средний балл – 1,5), очагов деструкции костной ткани (средний балл – 1,5), кальцинированных структур (кальцинаты в паренхиме легких, обызвествленные внутригрудные лимфатические узлы) (средний балл – 1,0). Потенциально ДЭР оказалась эффективной в визуализации переломов ребер без признаков консолидации (средний балл – 2,0) и патологических переломов ребер в сочетании с очагами деструкции (средний балл – 1,0), однако данный вид патологии был представлен единичными случаями. Коэффициент согласия между экспертами (каппа Флейса) по данным анализа стандартных рентгенограмм с РИМТ составил 0,55, что соответствует умеренной степени согласия (общий процент согласия 66 %).

С целью определения взаимосвязи между оценками каждого эксперта за РИМТ и РИКТ был выполнен корреляционный анализ с расчетом коэффициента Спирмена, по данным которого значимые связи отсутствовали.

Были проанализированы реконструированные изображения, получившие отрицательные оценки экспертов. К основным ограничениям методики были отнесены артефакты «зернистости», двигательные, связанные с дыханием и сердечными сокращениями и недостаточное подавление элементов костной плотности на РИМТ. Полученные данные коррелируют с результатами других исследований, указанные недостатки методики были определены в работах Z. Szucs-Farkas et al. (2011), K. Martini et al. (2017).

Согласно данным анализа, можно сделать вывод, что эксперты видят положительный эффект от применения ДЭР. Наличие реконструированных изображений позволяет повысить степень уверенности врачей-рентгенологов в своих заключениях, что подтверждается в работах других авторов. Так, в исследовании F. Manji et al. (2016) было определено значимое сокращение времени

интерпретации рентгенограмм как в группе опытных врачей-рентгенологов, так и в группе ординаторов при использовании ДЭР. Мы согласны с результатами, полученными в работе M. Gezer et al. (2019), которые подтверждают положительное влияние применения двухэнергетической методики в виде увеличения коэффициента согласия между двумя врачами-рентгенологами.

В исследованиях G. Boswell et al. (2022), Y. Song et al. (2021) была определена эффективность ДЭР в диагностике кальциатов аорты и коронарных артерий. В рамках данной диссертационной работы это не было доказано, вероятно, в связи с отсутствием соответствующего программного обеспечения. Также нам не удалось подтвердить эффективность ДЭР в оценке установки медицинских изделий (ЦВК, ЭКС, трахеостомы, инфузионные порт-системы), которая была подтверждена в исследованиях Y. Gao et al. (2015) и P. C. Chou, K. S. Karim (2023), что, вероятно, связано с отсутствием патологических состояний в группе обследуемых, связанных с миграцией, неправильной установкой указанных медицинских приборов.

На втором этапе клинического исследования проводился сравнительный анализ эффективности ДЭР и стандартной цифровой рентгенографии.

После проведения цифровой рентгенографии было выделено 5 групп пациентов в соответствии с выявленными изменениями:

1. инфильтративные изменения (n = 12, 24,0 %);
2. очаговые изменения и образования легких (n = 11, 22,0 %);
3. деструкция легочной ткани (n = 7, 14,0 %);
4. переломы ребер (n = 9, 24,0 %);
5. очаги деструкции костной ткани (n = 11, 22,0 %).

В первой группе применение ДЭР позволило в 11 (91,6 %) случаях подтвердить наличие инфильтрации легочной ткани, а в 7 (58,3 %) уточнить структуру затемнения. У 1 (8,3 %) пациента были выявлены клинически значимые изменения в виде полостей распада, которые не визуализировались на стандартном изображении. В 1 случае за участки затемнения на рентгенограмме были приняты консолидированные переломы передних отрезков ребер. По данным МСКТ в 4 случаях (36,4 %) дополнительно определен симптом «матового стекла».

Результаты нашего исследования коррелируют с результатами M. Gezer et al. (2019) и K. Martini et al. (2017), в которых продемонстрированы преимущества ДЭР в диагностике инфильтративных изменений в сравнении с традиционной методикой. Однако в проведенном исследовании не были получены данные, подтверждающие эффективность ДЭР в выявлении участков уплотнения легочной ткани по типу «матового стекла».

Во второй группе пациентов ДЭР позволила подтвердить наличие 16 (88,9 %) очаговых образований из 18 выявленных. В 2 (11,1 %) случаях за образование легкого была принята остеохондрома ребра ($n = 1, 5,6 \%$) и обызвествление первого грудинно-реберного сочленения ($n = 1, 5,6 \%$). Дополнительно удалось выявить 3 легочных узелка размерами от 6 до 8 мм. При выполнении МСКТ в 2 (18,2 %) случаях наличие образования в легких не было подтверждено, что связано недостаточным подавлением элементов костной плотности на РИМТ. Дополнительно определялось еще 5 очагов размерами до 6 мм. Мы согласны с результатами исследований H. Mogami et al. (2021), S. Kumar et al. (2015), по результатам которых ДЭР превосходит стандартную рентгенографию в выявлении легочных очагов от 6 мм.

В третьей группе пациентов ДЭР позволила подтвердить наличие полостей деструкции в легких у всех пациентов ($n = 7$). В 3 (42,9 %) случаях на РИМТ количество выявленных полостных образований превысило количество на стандартных рентгенограммах. Анализ компьютерных томограмм позволил подтвердить наличие изменений во всех случаях, по результатам которого дополнительно были определены участки консолидации в наддиафрагмальных отделах ($n = 1, 14,3 \%$), «матового стекла» ($n = 3, 42,9 \%$), легочные узелки до 6 мм ($n = 3, 42,9 \%$), а также признаки эмфиземы легких (11,1 %). В ранее опубликованных исследованиях аспект применения ДЭР в оценке деструктивных изменений легких не был рассмотрен. Результаты работы коррелируют с данными Mueller et al. (2021), согласно которым ДЭР не превосходит стандартную цифровую рентгенографию в диагностике эмфиземы легких.

Для сравнения информативности цифровой рентгенографии и ДЭР были определены показатели диагностической эффективности в выявлении основных рентгенологических признаков при легочной патологии. Согласно полученным данным, показатели чувствительности, специфичности, точности, прогностической ценности положительных и отрицательных результатов у ДЭР превосходили таковые у ЦР и составили 83,3 % против 63,3 %, 90,0 % против 70,0 %, 86,0 % против 66,0 %, 92,6 % против 76,0 % и 78,3 % против 56,0 % соответственно. Различия показателей чувствительности оказались статистически значимым ($p < 0,05$). Наши данные подтверждены в работе К. Martini et al. (2017).

В группе пациентов с выявленными переломами ребер у 4 (44,4 %) пациентов визуализировались свежие переломы, в остальных случаях ($n = 5$, 55,6 %) – с признаками консолидации. При анализе РИКТ у 2 (11,1 %) пациентов дополнительно были выявлены свежие переломы ребер, расположенные по подмышечным линиям, которые не визуализировались на стандартных рентгенограммах. У 1 пациента на реконструированном изображении определялся участок вздутия ребра, который на нативном изображении был ошибочно интерпретирован как консолидированный перелом. В данной группе МСКТ органов грудной клетки была выполнена 9 пациентам. В одном случае дополнительно был выявлен неконсолидированный перелом поперечного отростка позвонка Th12. В исследовании Z. Szucs-Farkas et al. (2011) была попытка оценить роль костного режима ДЭР в визуализации переломов ребер, однако в связи с использованием в работе одноимпульсной последовательности полученные реконструированные изображения были субоптимального качества, что не позволило достичь значимых различий ДЭР в визуализации переломов ребер в сравнении с ЦР.

В группу пациентов с выявленными изменениями структуры костной ткани в виде очагов деструкции входили больные с уже верифицированным диагнозом плазмноклеточной миеломы по данным цитоморфологического исследования костного мозга. Применение ДЭР позволило получить новую информацию в виде визуализации очагов деструкции в ребрах, ключицах, лопатках, проксимальных

отделах плечевых костей у 6 (54,5 %) больных. В 2 (18,2 %) случаях дополнительно определялись патологические переломы ребер. МСКТ органов грудной клетки в рамках комплексного лучевого обследования было выполнено 6 (54,5 %) пациентам. В 3 (27,3 %) случаях в ребрах дополнительно визуализировались очаги деструкции размерами до 3 мм. У 5 (45,5 %) больных были определены патологические компрессионные переломы тел позвонков. В 3 (27,3 %) случаях очаги деструкции костной ткани, локализованные в лопатке ($n = 2$), дистальном отделе ключицы ($n = 1$), выявленные по данным ДЭР, не были подтверждены. В ранее опубликованных работах не были рассмотрены аспекты применяя ДЭР с целью оценки очаговых деструкций костной ткани. В одном из первых исследований, посвященных оценке возможностей двухэнергетической методики, Т. Ishigaki et al. (1986) были обследованы 17 пациентов с костными метастазами, по результатам которого продемонстрирована эффективность ДЭР в оценке структуры костной ткани, что подтверждается в нашей работе.

С целью сравнения информативности цифровой рентгенографии и ДЭР была определена диагностическая эффективность изучаемых методик в определении основных рентгенологических признаков при патологии костной ткани. По данным сравнительного анализа чувствительность и прогностическая ценность отрицательных результатов ДЭР (85,0 и 90,0% соответственно) статистически значимо ($p < 0,05$) превысили показатели цифровой рентгенографии (45,0 и 71,8 % соответственно). Специфичность исследуемой методики оказалась ниже результатов ЦР 90,0 % в сравнении с 93,3 %, однако показатели были статистически незначимы ($p > 0,05$). Полученные результаты были подтверждены в работах Т. Ishigaki et al. (1986), К. Martini et al. (2017), Gezer et al. (2019).

Анализ полученных данных в совокупности с данными авторов исследований по аналогичной проблеме подтверждает высокую информативность ДЭР в диагностике патологических изменений органов и костных структур грудной клетки. На основании полученных результатов ДЭР может быть рекомендована к применению как самостоятельная методика на первом этапе диагностического поиска (Рисунок 31).



Рисунок 31 – Схема-алгоритм лучевого обследования пациентов с заболеваниями органов грудной клетки

ВЫВОДЫ

1. Двухэнергетическая рентгенография обладает высокой эффективностью и может использоваться как базовая методика обследования органов грудной клетки на первом этапе диагностического поиска.

2. Выработаны физико-технические условия съемки, позволяющие эффективно разделить режимы «мягкотканного» и «костного» окна.

3. При проведении скринингового исследования мягкотканная реконструкция двухэнергетической рентгенографии позволила улучшить визуализацию анатомических и патологических структур органов грудной клетки в 38 % случаев, а костная – в 35 %.

4. Двухэнергетическая рентгенография оказалась наиболее эффективной в диагностике очагов и образований легких, инфильтративных изменений, переломов ребер, очагов деструкции костной ткани, обызвествленных внутригрудных лимфоузлов и кальцинатов в паренхиме легких.

5. Чувствительность мягкотканной реконструкции двухэнергетической рентгенографии статистически значимо превышает показатели традиционной методики в определении основных рентгенологических признаков при легочной патологии (83,3 % против 63,3 %).

6. Чувствительность и прогностическая ценность отрицательных результатов значимо превышает показатели традиционной методики в определении основных рентгенологических признаков патологии костных структур грудной клетки (85,0 % против 45,0 % и 90 % против 71,8 %).

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для проведения ДЭР органов грудной клетки рекомендуется использовать следующие параметры:
 - напряжение на трубке: 130 кВ – 70 кВ для гиперстеников и 120 кВ – 60 кВ для астеников и нормостеников.
 - ток анода рентгеновской трубки: 500 мА для нормостеников и гиперстеников, 160 мА для астеников.
 - фокусное расстояние: 150–180 см.
 - дополнительные фильтры: 1 мм алюминия и 0,2 мм меди.
2. Процедура ДЭР выполняется по стандартной методике в прямой проекции, с задержкой дыхания после умеренного вдоха.
3. Методику ДЭР можно использовать на первом этапе диагностического поиска, что устраняет необходимость в выполнении ЦР.
4. ДЭР не может рассматриваться как замена или альтернатива томографическим методикам, однако в некоторых случаях может исключить необходимость в выполнении МСКТ, тем самым снизить нагрузку на кабинеты компьютерной томографии.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ДИ – доверительный интервал

ДРА – двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия

ДЭКТ – двухэнергетическая компьютерная томография

ДЭР – двухэнергетическая рентгенография

КСДМ – контрастная спектральная двухэнергетическая маммография

МБТ – микобактерии туберкулеза

МПК – минеральная плотность ткани

МСКТ – мультисрезовая компьютерная томография

НДКТ – низкодозная компьютерная томография

РИКТ – реконструированное изображение костных тканей

РИМТ – реконструированное изображение мягких тканей

ТС – томосинтез

ЦВК – центральный венозный катетер

ЦР – цифровая рентгенография

ЭКС – электрокардиостимулятор

Me – медиана

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева, О. М. Предварительные результаты изучения метода двойной энергии при рентгеновских исследованиях грудной полости / О. М. Алексеева, Д. И. Наумова, В. А. Нечаев и др. // Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов : Сборник тезисов конгресса, Санкт-Петербург, 09–11 ноября 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская общественная организация «Человек и его здоровье», 2020. – С. 8-9.
2. Алексеева, О. М. Технические аспекты реализации двухэнергетической рентгенографии / О. М. Алексеева, З. В. Булатов, Д. М. Касюк // Медицинское приборостроение и радиационная безопасность. – 2020. – № 1. – С. 232.
3. Белая, Ж. Е. Федеральные клинические рекомендации по диагностике, лечению и профилактике остеопороза / Ж. Е. Белая, К. Ю. Белова, Е. В. Бирюкова и др. // Остеопороз и остеопатии. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 4–47.
4. 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 др. // Лучевая диагностика и терапия. – 2020. – № 4. – С. 20-32.
5. Васильев, А. Ю. Артефакты изображений при проведении двухэнергетической рентгенографии органов грудной клетки / А. Ю. Васильев, Д. И. Наумова // Радиология – практика. – 2022. – № 5. – С. 50–56.
6. Васильев, А. Ю. Возможности методики двухэнергетической рентгенографии при рентгеновских исследованиях органов грудной клетки / А. Ю. Васильев, Д. И. Наумова, О. М. Алексеева др. // Радиология – практика. – 2021. – № 1. – С. 14–22.
7. Васильев, А. Ю. Двухэнергетическая рентгенография от экспериментального исследования к применению в клинической практике / А. Ю. Васильев, Д. И. Наумова // IX Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники: Программа и материалы конференции. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 26–29.

8. Васильев, А.Ю. Двухэнергетическая в диагностике заболеваний органов грудной клетки: проспективное исследование / А.Ю. Васильев, Д.И. Наумова, В.А. Нечаев // Медицинский вестник МВД. – 2024. – № 3. – С. 69–74.
9. Васильев, А.Ю. Двухэнергетическая цифровая рентгенография в диагностике заболеваний органов грудной клетки / А.Ю. Васильев, Д.И. Наумова // Радиология – 2023: Материалы XVII Всероссийского национального конгресса лучевых диагностов и терапевтов. – Москва, 2023. – С. 242.
10. Гаврилов, П. В. Выявление округлых образований в легких при цифровой рентгенографии: роль опыта работы врача-рентгенолога / П. В. Гаврилов, А. Д. Ушков, У. А. Смольникова // Медицинский альянс. – 2019. - № 2. – С. 51–56.
11. Гаврилов, П. В. Гиподиагностика и гипердиагностика при рентгенологическом исследовании органов грудной клетки (опыт тестирования врачей-рентгенологов) / П. В. Гаврилов, У.А. Смольникова // Медицинский альянс. – 2018. - № S3. – С. 38-40.
12. Гаврилов, П. В. Оценка диагностической точности системы автоматического анализа цифровых рентгенограмм легких при выявлении округлых образований / П. В. Гаврилов, У. А. Смольникова // Альманах клинической медицины. – 2021. – Т. 49, № 6. – С. 359-364.
13. Гаврилов, П. В. Стандартизованная интерпретация и контроль выявленных одиночных образований в легких по системе lung imaging reporting and data system (lung-rads™) / П.В. Гаврилов, И.А. Баулин, О.В. Лукина // Медицинский альянс. – 2017. – №. 3.
14. Жуков, Е.А. Система компьютерного зрения для анализа обзорных рентгенограмм органов грудной клетки: возможности искусственного интеллекта в обнаружении патологических изменений и инородных тел / Е.А. Жуков, Д.С. Блинов, В.С. Леонтьев // Врач. – 2020. – №5. – С.34-40.
15. Здравоохранение в России. 2023 : Статистический сборник / Ред. колл. : С.М. Окладников, С.Ю. Никитина и др. – М. : Росстат, 2023. – 179 с.

16. Зубова, Н. А. Туберкулез легких у пациентов, выявленный во время периодических осмотров и при обращении в медицинские организации / Н.А. Зубова, Э.Б. Цыбикова, В.В. Пунга и др. // Туберкулез и болезни легких. – 2016. – Т. 94. – №. 11. – С. 22-28.
17. Каприн, А.Д. Злокачественные новообразования в России в 2021 году (заболеваемость и смертность) / А.Д. Каприн В.В. Старинский, А.О. Шахзадова. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. – 252 с.
18. Каприн, А.Д. Состояние онкологической помощи населению России в 2022 году / А.Д. Каприн, В.В. Старинский, А.О. Шахзадова. – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2022. – 239 с.
19. Карлова, Е. А. Предварительные результаты использования двухэнергетической компьютерной томографии для дифференциальной диагностики очаговых образований печени / Е.А. Карлова, А.С. Савельева и др. // Медицинская визуализация. – 2016. – №. 1. – С. 47-53.
20. Карпущенко, В. Г. Актуальные вопросы профилактики туберкулеза в военно-медицинских организациях / В.Г. Карпущенко, А.А. Кузин, В.В. Данцев // Военно-медицинский журнал. – 2017. – Т. 338. – №. 1. – С. 39-44.
21. Ларюков, А.В. Возможности методов лучевой диагностики периферического рака легкого / А.В. Ларюков, Е.К. Ларюкова // Практическая медицина. – 2012.
22. Мазуров, А. И. Последние достижения в цифровой рентгенотехнике / А.И. Мазуров // Медицинская техника. – 2010. – Т. 5. – С. 10-13.
23. Маркелов, Ю. М. Оценка клинико-экономической эффективности и влияния массовых флюорографических осмотров на эпидемиологические показатели по туберкулезу в четырех федеральных округах РФ с различным уровнем охвата флюорографическими осмотрами населения / Ю.М. Маркелов, Л.В. Щеголева // Туберкулез и болезни легких. – 2023. – Т. 101. – №. 1. – С. 8-16.
24. Мастерова, И. Ю. Эффективность скринингового флюорографического обследования для выявления туберкулеза у больных ВИЧ-инфекцией / И.Ю.

Мастерова, В.Н. Зимина, П.В. Гаврилов и др. // Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы. – 2018. – №. 2. – С. 36-41.

25. Наумова, Д. И. Артефакты и ограничения двухэнергетической рентгенографии / Д.И. Наумова, А.Ю. Васильев // Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов: Сборник тезисов конференции. – Москва, 2020. – С. 151.

26. Наумова, Д. И. Возможности методики двойной энергии при рентгеновских исследованиях грудной полости / Д. И. Наумова, А. Ю. Васильев // «Лучевая диагностика – Смоленск: конкурс молодых ученых»: Сборник материалов IV межрегиональной научно-практической онлайн конференции с международным участием. – Смоленск, 2022. – С. 46.

27. Наумова, Д.И. Возможности двухэнергетической рентгенографии (костной реконструкции) при рентгенологических исследованиях органов грудной клетки / Д.И. Наумова // VOLGAMEDSCIENCE: Сборник тезисов VII Всероссийской конференции молодых ученых и студентов с международным участием: материалы конференции, Нижний Новгород, 2021. – С. 645-647.

28. Наумова, Д.И. Двухэнергетическая рентгенография как инновационная методика исследования органов грудной клетки / Д.И. Наумова // Сборник тезисов 69-ой Итоговой студенческой научной конференции МГМСУ имени А. И. Евдокимова. – Москва, 2021. – С. 48–50.

29. Наумова, Д.И. Результаты применения двухэнергетической рентгенографии органов грудной клетки в многопрофильном стационаре / Д.И. Наумова // Медицина завтрашнего дня: Материалы XXII научно-практической конференции студентов и молодых ученых с международным участием. – Чита, 2023. – С. 52-53.

30. Наумова, Д.И. Трудности применения методики двухэнергетической рентгенографии в диагностике патологии органов грудной клетки / Д.И. Наумова // Новые технологии лучевой диагностики и лечения: Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Самарканд, 2022. – С. 71.

31. Нечаев, В. А. Возможности томосинтеза в диагностике заболеваний и повреждений органов грудной клетки / В.А. Нечаев, А.Ю. Васильев // Современные технологии в медицине. – 2016. – № 2. – С. 59-65.
32. Нечаев, В. А. Применение томосинтеза в диагностике заболеваний органов грудной клетки / В.А. Нечаев, А.В. Бажин, Е.В. Новоселова // Радиология-практика. – 2015. – №. 5. – С. 14-21.
33. Нечаев, В.А. Стандартизация флюорографического скрининга заболеваний легких / В.А. Нечаев. – 2005.
34. Новиков, В. Е. Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия в клинических исследованиях и реальной практике. Вопросы воспроизводимости и качества / В.Е. Новиков, И.А. Скрипникова, Л.М. Мурашко // Остеопороз и остеопатии. – 2014. – №. 1. – С. 39-42.
35. Оксанчук, Е. А. Контрастная маммография в дифференциальной диагностике заболеваний молочных желез: первые результаты / Е.А. Оксанчук, А.Ю Колесник, Е.В. Меских // Research'n Practical Medicine Journal. – 2017. – №. S2. – С. 73.
36. Патент на изобретение RU 278135 С1 Российская Федерация. Способ двухэнергетической рентгенографии (варианты) / З. В. Булатов, А. Р. Дабагов, И. С. Кобылкин, А. В. Прохоров, В. И. Спорыш, Ю. Е. Шунков, Д. В. Поздняков, Д. М. Касюк. № 2020106388 : заявл. 11.02.2020 : опубл. 08.12.2020.
37. Патент на полезную модель № 204909 U1 Российская Федерация. Тест-объект / Н. Н. Потрахов, А. Ю. Васильев, Д. И. Наумова, Т. В. Павлова, Н. А. Шолохова. № 2020141333 : заявл. 14.12.2020 : опубл. 17.06.2021.
38. Петровичев, В. С. Двухэнергетическая компьютерная томография рака головы и шеи / В.С. Петровичев, М.В. Неклюдова, В.Е. Сеницын и др. // Digital diagnostics. – 2021. – Т. 2. - №3. – С. 343-355.
39. Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 21.03.2017 № 124н «Об утверждении порядка и сроков проведения профилактических медицинских осмотров граждан в целях выявления туберкулеза».

40. Приказ Министерства здравоохранения Российской Федерации от 27.04.2021 № 404н «Об утверждении Порядка проведения профилактического медицинского осмотра и диспансеризации определенных групп взрослого населения».

41. Ресурсы и деятельность противотуберкулезных организаций Российской Федерации в 2019-2020 гг. (статистические материалы). М.: РИО «ЦНИИОИЗ», 2021. – 112 с.

42. Савельева, А.С., Возможности двухэнергетической компьютерной томографии в дифференциальной диагностике очаговых образований печени / А.С. Савельева, Е.А. Карлова, А.В. Протопопов А.В. и др. // Лучевая диагностика и терапия. – 2018. - №4. С. -13-20.

43. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)».

44. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621801 Российская Федерация. Двухэнергетическая рентгенография органов грудной клетки / А. Ю. Васильев, А. Р. Дабагов, О. М. Алексеева, И. С. Кобылкин, Д. И. Наумова, В. А. Нечаев, Ю. Е. Шунков. № 2021621678 : заявл. 12.08.2021 : опубли. 25.08.2021.

45. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024621640 Российская Федерация. Диагностика заболеваний органов грудной клетки при помощи двухэнергетической рентгенографии, томосинтеза и компьютерной томографии / А. Ю. Васильев, Д. И. Наумова, А. Р. Дабагов, Е. А. Степанова, Н. Ю. Петухова, Ю. Е. Шунков, В. А. Нечаев. № 2024620719 : заявл. 04.03.2024 : опубли. 15.04.2024.

46. Серова, Н.С. Двухэнергетическая компьютерная томография в диагностике мочекаменной болезни / Серова Н.С., Л.Б. Капанадзе, В.И. Руденко // Медицинский вестник МВД. – 2019. – №. 6. – С. 54-60.

47. Стародубов, В. И. Заболеваемость туберкулезом в России в период до и во время пандемии COVID-19 / В.И. Стародубов, Э.Б. Цыбикова, М.Ю.

Котловский и др. // Инфекционные болезни: Новости. Мнения. Обучение. – 2023. – Т. 12. – №. 3 (46). – С. 18-25.

48. Тюрин, И. Е. Перспективы развития торакальной радиологии /И. Е. Тюрин // Практическая пульмонология. – 2011. - №4.

49. Тюрин, И. Е. Скрининг заболеваний органов дыхания: современные тенденции / И. Е. Тюрин // Практическая пульмонология. – 2011. – №. 2. – С. 12-16.

50. Тюрин, И.Е. Отчет за 2020 г. главного внештатного специалиста Минздрава России по лучевой и инструментальной диагностике [Электронный ресурс] / И.Е. Тюрин. – Режим доступа: https://static-0.minzdrav.gov.ru/system/attachments/attaches/000/056/620/original/%D0%9E%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_%D0%B7%D0%B0_2020_%D0%B3%D0%BE%D0%B4_%D0%A2%D1%8E%D1%80%D0%B8%D0%BD.pdf?1624967722

51. Ульянова, Р. Х. Дифференциальная диагностика патологии молочной железы с помощью типов накопления контрастного препарата при контрастной спектральной двухэнергетической маммографии/ Р.Х. Ульянова, А.В. Чёрная, П.В. Криворотько и др. // Вопросы онкологии. – 2020. – Т. 66. – №. 3. – С. 252-261.

52. Устинов, А. О. Качество и параметры реконструкции изображений в технологии томосинтеза / А.О. Устинов, А.Р. Дабагов, С.С. Карпов и др. // Медицинская техника. – 2018. – №. 4. – С. 310.

53. Устинов, А. О. Параметры реконструкции изображений в технологии двухэнергетической рентгенографии / А.О. Устинов, А.Р. Дабагов // Медицинская техника. – 2018. – №. 3. – С. 51-54.

54. Чёрная, А. В. Возможности контрастной спектральной двухэнергетической маммографии в диагностике мультицентричного рака молочной железы / В Чёрная, РХ Ульянова, ПВ Криворотько и др. // Опухоли женской репродуктивной системы. – 2021. – Т. 17. – №. 4. – С. 20-28.

55. Чёрная, А. В. Контрастная спектральная двухэнергетическая маммография — метод выбора в диагностике рака молочной железы у молодых женщин / А.В. черная, Р.Х. Ульянова, С.С. Багненко и др. // Радиология–практика. – 2023. – №. 3. – С. 11-23.

56. Чёрная, А. В. Новые технологии при выявлении рака молочной железы—контрастная двухэнергетическая спектральная маммография / А.В. Чёрная, С.Н. Новиков, П.В. Криворотько // Медицинская визуализация. – 2019. – №. 2. – С. 49-61.
57. Шунков, Ю. Е Техническая реализация методики двухэнергетической рентгенографии / Ю. Е. Шунков, И. С. Кобылкин, А. В. Прохоров и др. // Конгресс российского общества рентгенологов и радиологов : Сборник тезисов конгресса, Санкт-Петербург, 09–11 ноября 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургская общественная организация «Человек и его здоровье», 2020. – С. 211-212.
58. Шунков, Ю. Е. Уменьшение артефактов движения пациента в двухэнергетической рентгенографии / Ю.Е. Шунков, И.С. Кобылкин, А.В. Прохоров // Медицинская техника. – 2021. – №. 6. – С. 31-34.
59. Alvarez, R. E. Comparison of dual energy detector system performance / R.E. Alvarez, J.A. Seibert, S.K. Thompson // Medical physics. – 2004. – Vol. 31. – №. 3. – P. 556-565.
60. Alvarez, R. E. Energy-selective reconstructions in x-ray randomized tomography / R.E. Alvarez, A. Macovski // Physics in Medicine & Biology. – 1976. – Vol. 21. – №. 5. – P. 733.
61. Andermann, A. Revisiting Wilson and Jungner in the genomic age: a review of screening criteria over the past 40 years / A. Andermann, I. Blancquaert, S. Beauchamp et al. // Bulletin of the World Health Organization. – 2008. – Vol. 86. – №. 4. – P. 317-319.
62. Ansari-Gilani, K. Dual-energy subtraction chest radiography: application in cardiovascular imaging / K. Ansari-Gilani, Y.K. Tandon, D.W. Jordan et al. // Journal of Thoracic Imaging. – 2020. – Vol. 35. – №. 3. – P. W75-W81.
63. Basharat, F. Theoretical feasibility of dual-energy radiography for structural and functional imaging of chronic obstructive pulmonary disease / F. Basharat, M. Belli, M. Kirby et al. // Medical physics. – 2020. – Vol. 47. – №. 12. – P. 6191-6206.

64. Bayfield K. J. Implementation and evaluation of ultra-low dose CT in early cystic fibrosis lung disease / K.J. Bayfield, O. Weinheimer, C. Boyton // *European Respiratory Journal*. – 2023. – Vol. 62. – №. 1.
65. Berg, W. A. Detection of breast cancer with addition of annual screening ultrasound or a single screening MRI to mammography in women with elevated breast cancer risk / W.A. Berg, Z. Zhang, D. Lehrer et al. // *Jama*. – 2012. – Vol. 307. – №. 13. – P. 1394-1404.
66. Boswell, G. E. Dual-energy, dual-exposure PA and lateral chest radiograph: not your father's chest X-ray / G.E. Boswell, S.T. Wolfgramm, R.K. Fong et al. // *Military Medicine*. – 2023. – Vol. 188. – №. 1-2. – P. 12-15.
67. Brandan, M.-E. Clinical study of contrast-enhanced digital mammography and the evaluation of blood and lymphatic microvessel density / M. E. Brandan, J. P. Cruz-Bastida, I. M. RosadoMéndez, Y. Villaseñor-Navarro, H. Pérez-Ponce, H. A. Galván, F. E. Trujillo-Zamudio, P. SánchezSuárez, L. Benítez-Bribiesca // *British journal of radiology*. – 2016. – Vol. 89 – P. 1065.
68. Bretthauer, M. Estimated lifetime gained with cancer screening tests: a meta-analysis of randomized clinical trials / M. Bretthauer, P. Wieszczy et al. // *JAMA Internal Medicine*. – 2023. – Vol. 183. – №. 11. – P. 1196-1203.
69. Brody, W. R. A method for selective tissue and bone visualization using dual energy scanned projection radiography / W.R. Brody, G. Butt, A. Hall // *Medical physics*. – 1981. – Vol. 8. – №. 3. – P. 353-357.
70. Cheung, Y. C. Diagnostic performance of dual-energy contrast-enhanced subtracted mammography in dense breasts compared to mammography alone: interobserver blind-reading analysis / Y. C. Cheung, Y. C. Lin, Y. L. Wan, K. M. Yeow, P. C. Huang, Y. F. Lo, H. P. Tsai, S. H. Ueng, C. J. Chang // *Eur Radiol*. – 2014. – Vol. 24. – P. 2394–2403.
71. Chou, P. C. Single-exposure dual-energy radiography for the subtraction of in-dwelling devices in the soft tissue / P. C. Chou, K.S. Karim // *ECR 2023. EPOS*. – Vienna. – 2023.

72. De Koning, H. PL02. 05 effects of volume CT lung cancer screening: mortality results of the NELSON randomized-controlled population based trial / H. De Koning et al. // *Journal of Thoracic Oncology*. – 2018. – Vol. 13. – №. 10. – P. S185.
73. Dickson, J. L. Hesitancy around low-dose CT screening for lung cancer / J. L. Dickson, C. Horst, A. Nair et al. // *Annals of Oncology*. – 2022. – Vol. 33. – №. 1. – P. 34-41.
74. Do, Q. Automatic algorithm for determining bone and soft-tissue factors in dual-energy subtraction chest radiography / Q. Do, W. Seo, C.W. Shin // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2023. – Vol. 80. – P. 104354.
75. Doria-Rose, V. P. Randomized controlled trials of the efficacy of lung cancer screening by sputum cytology revisited: a combined mortality analysis from the Johns Hopkins Lung Project and the Memorial Sloan-Kettering Lung Study / V.P. Doria-Rose, P.M. Marcus, E. Szabo et al. // *Cancer: Interdisciplinary International Journal of the American Cancer Society*. – 2009. – Vol. 115. – №. 21. – P. 5007-5017.
76. Ducote, J. L. Dual-energy cardiac imaging: an image quality and dose comparison for a flat-panel detector and x-ray image intensifier / L.J. Ducote, T. Xu, S. Molloy // *Physics in Medicine & Biology*. – 2006. – Vol. 52. – №. 1. – P. 183.
77. Fallenberg, E. M. Contrast-enhanced spectral mammography: does mammography provide additional clinical benefits or can some radiation exposure be avoided? / E. M. Fallenberg, C. Dromain, F. Diekmann, D. M. Renz, H. Amer, B. Ingold-Heppner, A. U. Neumann, K. J. Winzer, U. Bick, B. Hamm, F. Engelken // *Breast cancer research and treatment*. – 2014. – Vol. 146. – P. 371-381.
78. Foley, W. D. White paper of the society of computed body tomography and magnetic resonance on dual-energy CT, part 2: radiation dose and iodine sensitivity / W.D. Foley, W.P. Shuman, M.J. Siegel et al. // *Journal of computer assisted tomography*. – 2016. – Vol. 40. – №. 6. – P. 846-850.
79. Fontana, R. S. et al. Lung cancer screening: the Mayo program / R.S. Fontana, D.R. Sanderson, L.B. Woolner et al. // *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. – 1986. – Vol. 28. – №. 8. – P. 746-750.

80. Foti G. Dual-Energy CT in Oncologic Imaging / G. Foti, G. Ascenti, A. Agostin et al. // *Tomography*. – 2024. – Vol. 10. – №. 3. – P. 299-319.
81. Francescone, M. A. Low energy mammogram obtained in contrast-enhanced digital mammography (CEDM) is comparable to routine full-field digital mammography (FFDM) / M. A. Francescone, M. S. Jochelson, D. D. Dershaw // *European journal of radiology*. – 2014. – Vol. 83. – № 8. P.1350-1355.
82. Fukao M. Optimization of dual-energy subtraction chest radiography by use of a direct-conversion flat-panel detector system / M. Fukao, K. Kawamoto, H. Matsuzawa // *Radiological physics and technology*. – 2015. – Vol. 8. – P. 46-52.
83. Gao, Y. Improved detection of an intravascular catheter using dual energy subtraction radiography / Y. Gao, R.G. Rowbottom, L.A. Landeras et al. // *Heart, Lung and Vessels*. – 2015. – Vol. 7. – №. 4. – P. 327.
84. Gennaro, G. Digital breast tomosynthesis versus digital mammography: a clinical performance study / G. Gennaro, A. Toledano, C. Di Maggio // *European radiology*. – 2010. – Vol. 20. – P. 1545-1553.
85. Gezer, M. C. Efficiency and reporting confidence analysis of sequential dual-energy subtraction for thoracic X-ray examinations / M.C. Gezer, O. Algin, A. Durmaz et al. // *Qatar Medical Journal*. – 2019. – Vol. 2019. – №. 1. – P. 9.
86. Grosse S. D. Disability and disability-adjusted life years: not the same / S.D. Grosse, D.J. Lollar, V.S. Campbell // *Public Health Reports*. – 2009. – Vol. 124. – №. 2. – P. 197-202.
87. Gupta, A. Dual energy imaging in cardiothoracic pathologies: A primer for radiologists and clinicians / A. Gupta, E.G. Kikano, K. Bera et al. // *European Journal of Radiology Open*. – 2021. – Vol. 8. – P. 100324.
88. Ha, A. S. Digital tomosynthesis to evaluate fracture healing: prospective comparison with radiography and CT / A. S. Ha, A. Y. Lee, D. S. Hippe et al. // *Am. J. Roentgenol*. – 2015. – Vol. 205. - № 1. – P. 136–141.
89. Ho, J. T. Comparison of dual-energy and conventional chest radiography for nodule detection / J.T. Ho, R.A. Kruger // *Investigative Radiology*. – 1989. – Vol. 24. – №. 11. – P. 861-868.

90. Houben, I.P. Contrast-enhanced spectral mammography as work-up tool in patients recalled from breast cancer screening has low risks and might hold clinical benefits / I. Houben, P. Van de Voorde, C. Jeukens, J. E. Wildberger, L. F. Kooreman, M. L. Smidt, M. B. I. Lobbes //European journal of radiology. – 2017. – Vol. 94. – P. 31-37
91. Huebener, K. H. Scanned projection radiography of the chest versus standard film radiography: a comparison of 250 cases / K.H. Huebener //Radiology. – 1983. – Vol. 148. – №. 2. – P. 363-368.
92. Ishigaki, T. One-shot dual-energy subtraction chest imaging with computed radiography: clinical evaluation of film images / T. Ishigaki, S. Sakuma, M. Ikeda // Radiology. – 1988. – T. 168. – №. 1. – C. 67-72.
93. Jungblut, L. Swiss pilot low-dose CT lung cancer screening study: first baseline screening results / L. Jungblut, H. Etienne, C. Zellweger et al. //Journal of clinical medicine. – 2023. – T. 12. – №. 18. – C. 5771.
94. Kanzaki, Y. Effect of high-and low-energy entrance surface dose allocation ratio for two-shot dual-energy subtraction imaging on low-contrast resolution / Y. Kanzaki, T. Kuramoto, S. Takarabe et al. //Radiography. – 2023. – Vol. 29. – №. 1. – P. 240-246.
95. Kelcz, F. Conventional chest radiography vs dual-energy computed radiography in the detection and characterization of pulmonary nodules / F. Kelcz, F.E. Zink, W.W. Peppler et al. //AJR. American journal of roentgenology. – 1994. – Vol. 162. – №. 2. – P. 271-278.
96. Kido, S. Clinical evaluation of pulmonary nodules with single-exposure dual-energy subtraction chest radiography with an iterative noise-reduction algorithm / S. Kido, J. Ikezoe, H. Naito et al. //Radiology. – 1995. – Vol. 194. – №. 2. – P. 407-412.
97. Kim, C. Effects of the technique parameters on the imaging performance of the dual-energy chest radiography / C. Kim, S. H. Yang, J. Kim //Journal of the Korean Physical Society. – 2021. – Vol. 78. – P. 849-859.

98. Koyama, S. Radiation dose evaluation in tomosynthesis and C-arm cone-beam CT examinations with an anthropomorphic phantom / S. Koyama, T. Aoyama, N. Oda et al. // *Med. Phys.* – 2010. – Vol. 37. - №. 8. – P. 4298–4306.
99. Kruger, R. A. Dual energy film subtraction technique for detecting calcification in solitary pulmonary nodules / R.A. Kruger, J.D. Armstrong, J.A. Sorenson et al. // *Radiology.* – 1981. – Vol. 140. – №. 1. – P. 213-219.
100. Kruger, R. A. Medical imaging strategies / R.A. Kruger // *Journal of Digital Imaging.* – 1988. – Vol. 1. – P. 13-17.
101. Kuhlman, J. E. Dual-energy subtraction chest radiography: what to look for beyond calcified nodules / J.E. Kuhlman, J. Collins, G.N. Brooks et al. // *Radiographics.* – 2006. – Vol. 26. – №. 1. – P. 79-92.
102. Kumar, S. G. Role of digital tomosynthesis and dual energy subtraction digital radiography in detecting pulmonary nodules / S.G. Kumar, M.K. Garg, N. Khandelwal et al. // *European Journal of Radiology.* – 2015. – Vol. 84. – №. 7. – P. 1383-1391.
103. Lalji, U. C. Evaluation of low-energy contrast-enhanced spectral mammography images by comparing them to full-field digital mammography using EUREF image quality criteria / U. C. Lalji, C. R. Jeukens, I. Houben, P. J. Nelemans, R. E. van Engen, E. van Wylick, R. G. Beets-Tan, J. E. Wildberger, L. E. Paulis, M. B. Lobbes // *European radiology.* – 2015. – Vol. 25. – № 10. – P. 2813- 2820.
104. LeBoff, M. S. The clinician's guide to prevention and treatment of osteoporosis / M.S. LeBoff, S.L. Greenspan, K.L. Insogna et al. // *Osteoporosis international.* – 2022. – Vol. 33. – №. 10. – P. 2049-2102.
105. Lee, M. Development of a non-linear dual-energy technique in chest radiography / M. Lee, D. Lee, H. Kim et al. // *Radiation Physics and Chemistry.* – 2020. – Vol. 172. – P. 108811.
106. Lehmann, L. A. Generalized image combinations in dual KVP digital radiography / L.A. Lehmann, R.E. Alvarez, A. Macovski et al. // *Medical physics.* – 1981. – Vol. 8. – №. 5. – P. 659-667.

107. Lewin, J. M. Dual-energy contrast-enhanced digital subtraction mammography: feasibility / J. M. Lewin, P. K. Isaacs, V. Vance, F. J. Larke //Radiology. – 2003. Vol. 229. – P. 261– 268.
108. Li, F. Improved detection of small lung cancers with dual-energy subtraction chest radiography / F. Li, R. Engelmann, K. Doi et al. //American Journal of Roentgenology. – 2008. – Vol. 190. – №. 4. – P. 886-891.
109. Liu, Y. Bone suppression of lateral chest x-rays with imperfect and limited dual-energy subtraction images / Y. Liu, F. Zeng, M. Ma et al. //Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2023. – Vol. 105. – P. 102186.
110. Liu, Y. Generating dual-energy subtraction soft-tissue images from chest radiographs via bone edge-guided GAN / Y. Liu, M. Liu, Y. Xi et al. //Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention–MICCAI 2020: 23rd International Conference, Lima, Peru, October 4–8, 2020, Proceedings, Part II 23. – Springer International Publishing, 2020. – P. 678-687.
111. Lopez Maurino, S. Diagnostic value of single-exposure dual-energy subtraction radiography in lung lesion detection: initial results / S. Lopez Maurino, K. S. Karim, V. Venkatesh et al. //ECR 2020. EPOS. – Vienna. – 2020.
112. Lorente-Ramos, R. Dual-energy x-ray absorptiometry in the diagnosis of osteoporosis: a practical guide / R. Lorente-Ramos, J Azpeitia-Armán, A Muñoz-Hernández et al. //American Journal of Roentgenology. – 2011. – Vol. 196. – №. 4. – P. 897-904.
113. Manji, F. Comparison of dual energy subtraction chest radiography and traditional chest X-rays in the detection of pulmonary nodules / F. Manji, J. Wang, G. Norman // Quantitative imaging in medicine and surgery. – 2016. – Vol. 6. – №. 1. – P. 1.
114. Martini, K. Diagnostic accuracy and added value of dual-energy subtraction radiography compared to standard conventional radiography using computed tomography as standard of reference / K. Martini K., M. Baessler, S. Baumüller // PloS One. – 2017. – Vol. 12. – №. 3. – P. e0174285.

115. Melamed, M. R. Screening for early lung cancer: results of the Memorial Sloan-Kettering study in New York / M.R. Melamed, B.J. Flehinger, M.B. Zaman et al. // *Chest*. – 1984. – Vol. 86. – №. 1. – P. 44-53.

116. Meltzer, C. E. A phantom study of tomosynthesis; do in-plane artifacts affect the estimated size of nodules? / C. E. Meltzer, Bath M., A. Johnsson et al. // *ECR 2014. EPOS*. – Vienna. – 2014.

117. Mettler, Jr F. A. Effective doses in radiology and diagnostic nuclear medicine: a catalog / F.A. Mettler Jr, W. Huda et al. // *Radiology*. – 2008. – T. 248. – №. 1. – C. 254-263.

118. Minato, K. Effectiveness of one-shot dual-energy subtraction chest radiography with flat-panel detector in distinguishing between calcified and non-calcified nodules / K. Minato, M. Yamazaki, T. Yagi et al. // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – №. 1. – P. 9548.

119. Mogami, H. Lung cancer screening by single-shot dual-energy subtraction using flat-panel detector / H. Mogami, Y. Onoike, H. Miyano et al. // *Japanese Journal of Radiology*. – 2021. – Vol. 39. – №. 12. – P. 1168-1173.

120. Mueller, J. A. Diagnostic performance of dual-energy subtraction radiography for the detection of pulmonary emphysema: an intra-individual comparison / J.A. Muller, K. Martini, M.A. Mueller // *Diagnostics*. – 2021. – Vol. 11. – №. 10. – P. 1849.

121. Muenzel, D. Material density iodine images in dual-energy CT: Detection and characterization of hypervascular liver lesions compared to magnetic resonance imaging / D. Muenzel, C.L. Grace et al. // *European Journal of Radiology*. – 2017. – Vol. 95. – P. 300–306.

122. National Lung Screening Trial Research Team. Reduced lung-cancer mortality with low-dose computed tomographic screening // *New England Journal of Medicine*. – 2011. – Vol. 365. – №. 5. – P. 395-409.

123. Nourian, A. Dual-energy CT for urinary stone evaluation / A. Nourian, E. Ghiraldi, J. I. Friedlander // *Current urology reports*. – 2021. – Vol. 22. – P. 1-6.

124. Obmann, V. C. Bone subtraction radiography in adult patients with cystic fibrosis / V.C. Obmann, A. Christe, L. Ebner et al. //Acta radiologica. – 2017. – Vol. 58. – №. 8. – P. 929-936.

125. Oda, S. Detection of small pulmonary nodules on chest radiographs: efficacy of dual-energy subtraction technique using flat-panel detector chest radiography / S. Oda, K. Awai, Y. Funama et al. //Clinical radiology. – 2010. – Vol. 65. – №. 8. – P. 609-615.

126. Oken, M. M. Baseline chest radiograph for lung cancer detection in the randomized Prostate, Lung, Colorectal and Ovarian Cancer Screening Trial / M.M. Oken, P.M. Marcus, P. Hu et al. //Journal of the National Cancer Institute. – 2005. – Vol. 97. – №. 24. – P. 1832-1839.

127. Pastorino, U. Prolonged lung cancer screening reduced 10-year mortality in the MILD trial: new confirmation of lung cancer screening efficacy / U. Pastorino, M. Silva, S. Sestini et al. //Annals of Oncology. – 2019. – Vol. 30. – №. 7. – P. 1162-1169.

128. Patino, M. Material separation using dual-energy CT: Current and emerging applications / M. Patino, A. Prochowski, M.D. Agrawal et al. //Radiographics. -2016. – Vol. 36. – P. 1087–1105.

129. Perry, N. European guidelines for quality assurance in breast cancer screening and diagnosis. Fourth edition – summary document / N. Perry, M. Broeders, C. de Wolf // Annals of oncology. – 2007. – Vol. 19. – P. 614-622.

130. Primak, A. N. Improved dual-energy material discrimination for dual-source CT by means of additional spectral filtration / A.N. Primak, J.C. Ramirez Giraldo, X. Liu et al. //Medical physics. – 2009. – Vol. 36. – №. 4. – P. 1359-1369.

131. Richard S. Cascaded systems analysis of noise reduction algorithms in dual-energy imaging / S. Richard, J.H. Siewerdsen //Medical physics. – 2008. – Vol. 35. – №. 2. – P. 586-601.

132. Rossini, M. Guidelines for the diagnosis, prevention and management of osteoporosis / M. Rossini, S. Adami et al. //Reumatismo. – 2016. – Vol. 68. – №. 1. – P. 1-39.

133. Sabih, D.E. Image perception and interpretation of abnormalities; can we believe our eyes? Can we do something about it? /D.E. Sabih, A. Sabih, Q. Sabih et al. // *Insights Imaging*. – 2011. – Vol 2. – P. 47–55.
134. Schaefer-Prokop, C. Digital chest radiography: an update on modern technology, dose containment and control of image quality / C. Schaefer-Prokop, U. Neitzel, H.W. Venema // *European radiology*. – 2008. – Vol. 18. – P. 1818-1830.
135. Shunkov, Y. E. Motion artefact reduction in dual-energy radiography / Y. E. Shunkov, I.S. Kobylkin, A.V. Prokhorov et al. // *Biomedical Engineering*. – 2022. – Vol. 55. – №. 6. – P. 415-419.
136. Siegel, M.J. White Paper of the Society of Computed Body Tomography and Magnetic Resonance on Dual-Energy CT, Part 1: Technology and Terminology / M.J. Siegel, R.K. Kaza, D.N. Bolus // *J. Comput. Assist. Tomog.* – 2016. – Vol. 40. - P. 841–845.
137. Silva, A. C. Dual-energy (spectral) CT: applications in abdominal imaging / A.C. Silva, B.G. Morse, A.K. Hara et al. // *Radiographics*. – 2011. – Vol. 31. – №. 4. – P. 1031-1046.
138. Song, Y. Detection of coronary calcifications with dual energy chest X-rays: clinical evaluation / Y. Song, H. Wu, D. Wen et al. // *The international journal of cardiovascular imaging*. – 2021. – Vol. 37. – P. 767-774.
139. Stolzmann, P. Endoleaks after endovascular abdominal aortic aneurysm repair: detection with dual-energy dual-source CT / P. Stolzmann, T. Frauenfelder, T. Pfammatter et al. // *Radiology*. – 2008. – Vol. 249. – P. 682–691.
140. Szucs-Farkas, Z. Bone images from dual-energy subtraction chest radiography in the detection of rib fractures / Z. Szucs-Farkas, K. Lautenschlager, P.M. Flach // *European journal of radiology*. – 2011. – Vol. 79. – №. 2. – P. e28-e32.
141. Thelle, A. Pneumothorax size measurements on digital chest radiographs: Intra-and inter-rater reliability / A. Thelle, M. Gjerdevik, T. Grydeland et al. // *European journal of radiology*. – 2015. – Vol. 84. – №. 10. – P. 2038-2043.

142. Tian, S.F. Application of computed tomography Virtual Noncontrast Spectral Imaging in evaluation of hepatic metastases: a preliminary study / S.F. Tian, A.L. Liu, J.H. Liu et al. //Chin. Med. J. – 2015. – Vol. 128. – Is. 5. – P. 610–614.

143. Urbaneja, A. Added value of bone subtraction in dual-energy digital radiography in the detection of pneumothorax: impact of reader expertise and medical specialty / A. Urbaneja, G. Dodin, G. Hossu et al. //Academic Radiology. – 2018. – Vol. 25. – №. 1. – P. 82-87.

144. Wen, D. Enhanced coronary calcium visualization and detection from dual energy chest x-rays with sliding organ registration / D. Wen, K. Nye, B. Zhou //Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2018. – Vol. 64. – P. 12-21.

145. Wilson, J. M. G. Principles and practice of screening for disease / J. M. G. Wilson, G. Jungner //Public Health Papers of the World Health Organization. – 1968.

146. Yamazaki, A. Development of Artificial Intelligence-Based Dual-Energy Subtraction for Chest Radiography / A. Yamazaki, A. Koshida, T. Tanaka et al. // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – №. 12. – P. 7220.

147. Zarshenas, A. Separation of bones from soft tissue in chest radiographs: Anatomy-specific orientation-frequency-specific deep neural network convolution / A. Zarshenas, J. Liu, P. Forti et al. //Medical physics. – 2019. – Vol. 46. – №. 5. – P. 2232-2242.

148. Zhao, F. Experimental Study of Detection of Nodules Showing Ground-Glass Opacity and Radiation Dose by Using Anthropomorphic Chest Phantom: Digital Tomosynthesis and Multidetector CT / F. Zhao, Y. Zeng, G. Peng et al. //J. Comput.Assist. Tomogr. – 2012. – Vol. 36. - №5. – P. 523–527.

149. Zhou, B. Detection and quantification of coronary calcium from dual energy chest x-rays: Phantom feasibility study / B. Zhou, D. Wen, K. Nye //Medical physics. – 2017. – Vol. 44. – №. 10. – P. 5106-5119.