

УДК 616-073.756.8

<http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-3-54-71>

© Беркович Г.В., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Труфанов Г.Е., 2021 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ОРГАНОВ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ, ПОЛУЧЕННЫХ НА НИЗКОДОЗОВЫХ ПРОТОКОЛАХ СКАНИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ИТЕРАТИВНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ

¹Г. В. Беркович*, ²А. В. Водоватов, ^{2,3}Л. А. Чипига, ¹Г. Е. Труфанов

¹Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П. В. Рамзаева, Санкт-Петербург, Россия

³Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова, Санкт-Петербург, Россия

Введение. В связи с тем, что компьютерная томография (КТ) ассоциирована с высокими индивидуальными дозами облучения пациентов, актуальными являются вопросы оптимизации КТ-исследований путем разработки низкодозовых протоколов сканирования.

Цель исследования: клиническая апробация низкодозовых протоколов, разработанных авторами ранее, выбор наиболее перспективного протокола, оценка применимости разработанного алгоритма экспертной оценки качества КТ-изображений.

Материалы и методы. Обследованы 96 пациентов, перенесших кардиохирургические вмешательства, с подозрением на инфекционные осложнения в легких и/или в зоне оперативного вмешательства. Сканирование проводилось с использованием стандартного, низкодозового и ультранизкодозового протоколов (эффективная доза $3,5 \pm 0,9$, $1,7 \pm 0,1$ и $0,8 \pm 0,1$ мЗв соответственно) с применением двух алгоритмов итеративной реконструкции (IMR и iDose). Проведена оценка качества полученных данных с привлечением 5 врачей-рентгенологов с опытом работы более 5 лет в кардиоторакальной визуализации.

Результаты. По числу ошибочных интерпретаций не было получено значимых различий между стандартным и низкодозовым протоколами для всех методов реконструкции. Ультранизкодозовый протокол характеризовался значимо большим количеством пропусков патологических изменений.

Заключение. Результаты исследования позволяют рекомендовать низкодозовый протокол в качестве альтернативы стандартному при обследовании пациентов без избыточной массы тела, которым требуется неоднократное проведение КТ-исследований с предпочтительным использованием метода реконструкции IMR.

Ключевые слова: компьютерная томография, низкодозовая КТ, оптимизация, итеративные реконструкции

*Контакт: Беркович Глеб Владимирович, glebberkovich@gmail.com

© Berkovich G.V., Vodovatov A.V., Chipiga L.A., Trufanov G.E., 2021

THE RESULTS OF APPROBATION OF A COMPREHENSIVE EXPERT ASSESSMENT OF THE QUALITY OF CT IMAGES OF THE CHEST OBTAINED ON LOW-DOSE SCANNING PROTOCOLS USING ITERATIVE RECONSTRUCTION METHODS

¹Gleb V. Berkovich*, ²Aleksandr V. Vodovatov, ^{2,3}Larisa A. Chipiga, ¹Gennadiy E. Trufanov

¹Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg institute of radiation hygiene name after prof. P. V. Ramzaev, St. Petersburg, Russia

³A. M. Granov Russian Scientific Center of Radiology and Surgical Technologies, St. Petersburg, Russia

Introduction. Computed tomography (CT) is associated with high individual patient doses. Hence, the process of optimization in CT examinations by developing low-dose scan protocols is important.

Purpose of the study. Clinical approbation of low-dose protocols developed by the authors earlier, selection of the most promising protocol, assessment of the applicability of the developed algorithm for expert assessment of the quality of CT images.

Materials and methods. The study was based on the data from 96 patients who underwent cardiac surgery with suspected infection in the lungs or sternal wound infection. CT examinations were performed using standard, low-dose and ultra-low-dose protocols (effective dose $3,5 \pm 0,9$, $1,7 \pm 0,1$ and $0,8 \pm 0,1$ mSv, respectively) using two iterative reconstruction algorithms (IMR and iDose). The quality of the obtained data was assessed by 5 radiologists with more than 5-year experience in chest radiology.

Results. In terms of the number of misinterpretations, no significant differences were estimated between the standard and low-dose protocols for all reconstruction methods. The ultra-low-dose protocol was characterized by a significantly higher number of missing lesions compared to other protocols.

Conclusion. The developed method of assessment of the CT image quality has proven to be informative and reproducible and can be used to assess new scanning protocols.

Key words: computed tomography, low-dose CT, ALARA, iterative reconstruction

*Contact: Berkovich Gleb Vladimirovich, glebberkovich@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Беркович Г.В., Водоватов А.В., Чипига Л.А., Труфанов Г.Е. Результаты апробации комплексной экспертной оценки качества КТ-изображений органов грудной клетки, полученных на низкодозовых протоколах сканирования с применением методов итеративных реконструкций // *Лучевая диагностика и терапия*. 2021. Т. 12, № 3. С. 54–71. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-3-54-71>.

Conflict of interests: the author stated that there is no potential conflict of interests.

For citation: Berkovich G.V., Vodovатов A.V., Chipiga L.A., Trufanov G.E. The results of approbation of a comprehensive expert assessment of the quality of CT images of the chest obtained on low-dose scanning protocols using iterative reconstruction methods // *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2021. Vol. 12, No. 3. P. 54–71. <http://dx.doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-3-54-71>.

Введение. Компьютерная томография (КТ) является высокостребованным методом лучевой диагностики. Наряду с такими неоспоримыми преимуществами этого метода, как информативность, доступность, быстрота сканирования, КТ характеризуется высокими уровнями доз ионизирующего излучения. В связи с этим остаются актуальными разработка и внедрение методик оптимизации (снижения доз облучения пациентов) при проведении КТ-исследований. За последние в Российской Федерации 5 лет вклад КТ в коллективную дозу вырос с 34% в 2013 до 50,5% в 2018 г., при этом индивидуальная доза увеличилась на 40% за этот же срок [1, с. 21; 2, с. 43; 3, с. 8]. Помимо этого, в условиях пандемии COVID-19 наблюдается резкое увеличение числа исследований легких с применением компьютерной томографии [1, с. 22; 2, с. 43; 4, с. 10].

На практике основной проблемой при проведении оптимизации является поиск баланса между дозой ионизирующего излучения (ИИ) и качеством КТ-изображения [5, с. 105; 6, с. 198; 7, с. 71; 8, с. 122; 9, с. 9]. Снижение дозы ионизирующего излучения всегда должно сопровождаться контролем качества, так как при чрезмерном ее уменьшении качество изображения может быть ниже диагностического, что может повлечь за собой либо диагностическую ошибку, либо необходимость повторного сканирования на других параметрах и, следовательно, необоснованного повторного облучения пациента [10, с. 980].

При этом основным критерием применимости тех или иных настроек КТ-оборудования можно считать удовлетворенность им врача-рентгенолога, описывающего исследование.

В предыдущих работах авторов были детально описаны взаимоотношения параметров проведения КТ-исследований и качества КТ-изображения, в том числе различные способы оценки качества КТ-изображения (оценка физико-технических параметров изображения и экспертная оценка качества) [1, с. 30; 2, с. 54].

Результаты этих работ показали слабую корреляцию между физико-техническими параметрами и экспертной оценкой качества. Оценка физико-технических параметров изображения не может быть рекомендована в качестве полноценной альтернативы для экспертной оценки качества изображения.

В связи с этим целесообразной является разработка методики экспертной оценки качества КТ-

изображения с привлечением практикующих врачей рентгенологов в условиях, приближенных к реальной практике. Данная методика была предварительно верифицирована в работе по оценке качества КТ-изображения и выявляемости очагов по типу «матового стекла» с применением антропоморфного фантома и имитаторов очагов [1, с. 23].

Однако, с учетом многообразия патологических изменений у реальных пациентов, данная методика требовала модернизации и апробации в условиях реальной клинической практики.

Целью данной работы являлась апробация предложенных низкодозовых протоколов, выбор наиболее перспективного протокола, а также оценка применимости разработанного алгоритма экспертной оценки качества КТ-изображений в клинической практике.

Материалы и методы.

1. Характеристики пациентов, критерии включения и исключения. В исследование было включено 96 взрослых пациентов, перенесших кардиохирургическое вмешательство в рамках текущей госпитализации, с подозрением на воспалительные изменения в грудной клетке (пневмония или инфекция области хирургического вмешательства). При этом сканирование у 50 пациентов осуществлялось с использованием стандартного протокола сканирования (контрольная группа), у 46 пациентов — только с использованием наиболее перспективных низкодозовых настроек, выбранных в ходе эксперимента с антропоморфным фантомом (исследуемая группа).

Разрешение на проведение исследования на пациентах выдано этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова», выписка № 1312-17 из протокола заседания ЛЭК от 11.12.2017 г.

Критерии включения пациентов в исследование:

- 1) кардиохирургическая операция в рамках данной госпитализации;
- 2) наличие эпикриза-направления на КТ от лечащего врача, подписанное заведующим отделением и заместителем главного врача по лечебной работе; формулировка цели исследования в эпикризе: поиск очага инфекции, исключение внутрибольничной пневмонии, инфекции области хирургического вмешательства или аналогичная;
- 3) объективные данные обследования, позволяющие предположить воспалительные изменения в грудной клетке (повышенная температура, слабость, дан-

ные физикального осмотра дежурным хирургом области хирургического вмешательства и др.);

4) лабораторные данные: лейкоцитоз, повышенный уровень СРБ и др.

5) подписание информированного согласия.

Критерии исключения:

1) неспособность лежать неподвижно в течение ≥ 5 минут;

2) невозможность задержать дыхание на время сканирования, нахождение пациента на ИВЛ;

3) невозможность пациента провести сканирование с поднятыми вверх руками;

4) наличие выраженных артефактов от металлических конструкций в теле пациента;

5) беременность.

При формировании выборки также учитывался индекс массы тела пациента так, чтобы на каждое значение дозы и примененный алгоритм реконструкции приходилось одинаковое количество пациентов с индексом массы тела более 25 и менее 25.

Характеристика обследованных пациентов представлена в табл. 1.

Структура проведенных кардиохирургических вмешательств для обследованной группы пациентов: 69 пациентов после шунтирования (48 пациентов с изолированным шунтированием, 21 пациент с комбинацией шунтирования и других оперативных вмешательств — протезирование аортального клапана, аорты, пластики клапанов сердца и др.). Помимо этого, в группу вошли 15 пациентов после протезирования аортального клапана (изолированно или с протезированием аорты), 4 пациента после протезирования трикуспидального клапана, 3 пациента после пластики митрального клапана и др.

ния воздуха/газа, ретроостеральные гематомы, воспалительные изменения в подкожно-жировой клетчатке, КТ-признаки медиастинита, диастаз половин грудины и несостоятельность лигатур.

Помимо этого, сортировка пациентов проводилась по индексу массы тела (ИМТ), чтобы в каждой группе протоколов сканирования было представлено одинаковое количество пациентов с нормальным и избыточным ИМТ.

На основе полученных данных была проведена сортировка для формирования итоговой выборки с включением в нее 18 пациентов.

Такие изменения, как жидкостные скопления в плевральной полости, компрессионные ателектазы, отек ретроостеральной клетчатки, которые выявлялись у большинства пациентов и были гарантированно видны на КТ, не были включены в критерии отбора, однако также наблюдались у пациентов в итоговой выборке в связи с их распространенностью. Таким образом, был охвачен весь спектр регистрируемой у таких пациентов патологии.

2. Характеристики оборудования и протоколов. Исследование проводилось на 128-срезовом спиральном компьютерном томографе Philips Ingenuity CT (Philips Medical Systems Inc., Кливленд). Минимальное время ротации 0,4 сек. Ширина детектора 4 см. Количество рентгеновских трубок — 1. Томограф был оснащен следующими алгоритмами реконструкций:

1) метод обратных проекций (FBP), суммационный метод реконструкции, традиционно используемый в компьютерной томографии;

2) метод итеративной реконструкции (iDose4) для улучшения качества изображения при низкодозе

Таблица 1

Антропометрические характеристики обследованных пациентов
(данные представлены в формате среднее \pm стандартное отклонение; минимум-максимум)

Table 1

Anthropometric characteristics of the examined patients
(data are presented as mean \pm standard deviation; minimum-maximum)

Возраст, лет	Число мужчин	Число женщин	Масса тела, кг	Индекс массы тела, кг/м ²	Среднее количество дней после проведения кардиохирургической операции
62 \pm 12	76	20	82 \pm 13	28,2 \pm 4,6	19 \pm 14
(28–83)	79,20%	20,80%	(50–120)	(20,0–42,5)	(7–100)

Сложность проведения оценки качества на всех обследованных пациента заключалась в значительных временных затратах для участвующих в работе врачей-экспертов при анализе КТ-данных 96 пациентов. С целью формирования выборки пациентов для клинического этапа оценки качества проведен предварительный анализ КТ-данных по наиболее актуальным встречающимся патологическим изменениям среди данной группы пациентов за период 2018–2019 гг.

К таким изменениям относили: очагово-инфильтративные изменения в легких, локальные зоны сниженной пневматизации, ретроостеральные включе-

зовом сканировании (гибридные, статистические реконструкции);

3) метод модельной итеративной реконструкции (IMR) для сканирования головы, шеи, сердца, грудной клетки, брюшной полости, малого таза и конечностей (модельные итеративные реконструкции).

Сканирование контрольной группы пациентов осуществлялось на стандартном протоколе, используемом для сканирования органов грудной клетки в кабинете КТ, рекомендованным для данного томографа Американским обществом физиков в медицине (AAPM). Характеристики протокола: 120 кВ,

Dose right index, DRI 14, с включенной модуляцией силы тока по оси XY и по оси Z (3D-модуляция).

Для исследуемой группы пациентов проводилось двойное сканирование с применением протоколов, разработанных на этапе работы с антропоморфным фантомом: сканирования с дозой в 2 раза меньше стандартной и сканирования с дозой в 4 раза меньше исходной — низкодозовый и ультранизкодозовый протоколы [1]. В соответствии с данными литературы за низкодозовое сканирование принимался протокол сканирования с эффективной дозой 1,4–2 мЗв, за ультранизкодозовое сканирование — протоколы сканирования с эффективной дозой менее 1 мЗв [11, с. 395; 12, с. 65; 13, с. 1094; 14, с. 248; 15, с. 210; 16, с. 134; 17, с. 1167].

Сканирование проводили с использованием технологий угловой модуляции силы тока и модуляции по оси Z (3D-модуляция). В связи с этим в целях соответствия протоколов характеристикам сканирования, использованным на этапе с антропоморфным фантомом, верхние значения силы тока были ограничены 71 мАс для низкодозового протокола и 35 мАс для ультранизкодозового протокола (табл. 2).

3. Методика проведения экспертной оценки качества изображения. Авторами статьи были подготовлены полноценные анонимизированные и рандомизированные КТ-исследования пациентов (серии изображений, реконструированные в легочном и медиастинальном окне, с возможностью пролистывания), соответствующие условиям работы врача-рентгенолога. В ходе анализа изображений врачи-рентгенологи имели возможность изменять уровень и ширину окна в зависимости от необходимости и личных предпочтений, масштабировать изображения, а также формировать реконструкции проекции максимальной интенсивности.

КТ-изображения были загружены в сертифицированную программу по работе с КТ-данными Intellispace Portal. Для анализа изображений были использованы мониторы, сертифицированные для работы с КТ-изображениями. Работа с изображениями производилась в стандартных для данного КТ-кабинета условиях.

Экспертную оценку проводили 5 врачей-рентгенологов (стаж работы в области компьютерной томографии 5–10 лет). Каждый врач получал набор из 18

Таблица 2

Характеристики протоколов сканирования

Table 2

Scan protocol characteristics

Протокол	Экспозиция, мАс	Анодное напряжение, кВ	Время вращения трубки, с	Коллимация	Питч
Стандартный	142	120	0,4	64×0,625	1,048
Низкодозовый	71	100	0,4	64×0,625	1,048
Ультранизкодозовый	35	100	0,4	64×0,625	1,048

Таблица 3

Характеристика итоговой выборки пациентов

Table 3

Data on the final sample of patients

Алгоритм реконструкции	Стандартный протокол	Индекс массы тела, кг/м ²	Экспериментальный-1 (низкодозовый)	Индекс массы тела, кг/м ²	Экспериментальный-2 (ультранизкодозовый)	Индекс массы тела, кг/м ²
Алгоритм IMR	Пациент 1	27,1	Пациент 7	28,7	Пациент 13	25
	Пациент 2	29,8	Пациент 8	22,3	Пациент 14	32,6
	Пациент 3	24,5	Пациент 9	22,6	Пациент 15	29,7
Алгоритм iDose	Пациент 4	38	Пациент 10	23,7	Пациент 16	24,8
	Пациент 5	24,9	Пациент 11	32	Пациент 17	22,6
	Пациент 6	24,4	Пациент 12	33,9	Пациент 18	36,3

Полученные изображения реконструировали с применением гибридного (iDose) и модельного (IMR) алгоритмов итеративной реконструкции. В обоих случаях получали изображения в мягкотканном режиме (мягкий kernel, толщина среза 2 мм) и легочном режиме (жесткий kernel, толщина среза 1 мм).

Основываясь на результатах предыдущих этапов работы [1–2], алгоритм FBP исключили из числа рассматриваемых.

Таким образом, итоговая выборка, используемая при проведении работы, представлена в табл. 3.

КТ-исследований, представленных данными 18 различными пациентами и 6 уникальными настройками (доза и алгоритм реконструкции). Для получения статистической достоверности результатов к работе были привлечены 5 врачей-рентгенологов.

В рамках подготовки к эксперименту врачей-экспертов обучали методике с использованием КТ-пациентов, не вошедших в итоговую выборку.

Для оценки качества изображения в рамках диагностического подхода был разработан опросник, основанный на европейских критериях качества КТ-

изображения (European guidelines on quality criteria for computed tomography, 1999). Были выбраны наиболее значимые критерии, которые могут быть легко оценены и воспроизведены. При этом часть критериев для стандартной КТ и КТ высокого разрешения была объединена на основе опубликованных данных [18, с. 240].

Параметры, включенные в опросник, включали в себя оценку визуализации патологических изменений, нормальной анатомии, уровня шума на изображении и общей оценки качества изображения.

К оцениваемым патологическим изменениям относились:

- визуализация очагово-инфильтративных изменений;
- визуализация линейных, ретикулярных изменений (утолщения междольного интерстиция, дискателектазы и др.);
- визуализация зон повышенной воздушности (буллы, эмфизема и др.);
- визуализация зон сниженной воздушности (матовое стекло, зоны консолидации);
- визуализация жидкостных скоплений (плевральный выпот, выпот в полости перикарда);
- визуализация изменений в области хирургического вмешательства (медиастинит, уплотнение клетчатки, скопления жидкости, включения газа/воздуха, ретростернальная клетчатка);
- визуализация костных изменений (диагностические признаки половины грудины, несостоятельность лигатур, признаки костной деструкции, переломы ребер).

К оцениваемым нормальным анатомическим структурам относились:

- крупные бронхи и сосуды (долевые, сегментарные);
- сегментарные бронхи и сосуды;
- мелкие сосудистые структуры в периферических отделах легких (в пределах 2 см от висцеральной плевры), структуры вторичной легочной дольки;
- междолевая висцеральная плевроа;
- структуры средостения (аорта, легочная артерия, лимфатические узлы, трахея, пищевод, камеры сердца);
- костные структуры (ребра, грудина, позвонки).

Для выставления балльной оценки использовались следующие критерии.

1 балл — структура прослеживается неотчетливо или частично, значимо изменена, контуры выражено размыты, нечеткие, границы не прослеживаются, оценка невозможна.

2 балла — визуализация структуры выражено снижена, контуры размыты, нечеткие, границы прослеживаются неотчетливо, качество визуализации недостаточное для достоверной оценки, оценка значимо затруднена.

3 балла — удовлетворительная визуализация структуры, контуры довольно четкие с умеренно выраженным размытием, границы прослеживаются,

качество визуализации удовлетворительное, достаточное для достоверной оценки.

4 балла — хорошая визуализация деталей, границ, возможна минимально выраженная размытость, нечеткость контуров, не влияющая на качество визуализации, достоверная оценка с незначительными сложностями.

5 баллов — отличная визуализация деталей и контуров, размытие отсутствует, достоверная оценка без затруднений.

В связи с тем, что исследование было направлено на оценку применимости предложенных низкодозовых протоколов для очагово-инфильтративных изменений в легких для всей совокупности патологических изменений было принято решение, что все параметры качества изображения имеют одинаковый удельный вес (одинаково значимы).

В качестве характеристики качества КТ-изображения использовались следующие параметры.

Значения оценки за изображение для патологических изменений (определялся как сумма всех баллов за по каждой категории — минимально — 7, максимально 35). Порог приемлемых значений составил 21 балл.

Значения оценки за изображение для нормальной анатомии ОГК (определялся как сумма всех баллов за по каждой категории — минимально — 6, максимально 30). Порог приемлемых значений составил 18 баллов.

Общий балл за изображение патологических и нормальных структур (определялся как сумма всех баллов за по каждой категории — минимально — 13, максимально 65). Порог приемлемых значений составил 39 балл.

Помимо этого, оценивались следующие параметры:

- уровня шума на изображении в легочном окне;
- уровня шума на изображении в мягкотканном окне;
- общая характеристика изображения (применительно к уверенности в заключении).

Для оценки шума применялась пятибалльная шкала.

1 балл — шум превалирует на изображении.

2 балла — изображение выражено зашумлено.

3 балла — умеренно выраженный шум.

4 балла — минимально выраженный шум.

5 балла — отсутствие шума на изображении.

Также проведена оценка диагностической значимости изображений, полученных с использованием различных протоколов в выявлении патологических изменений на КТ-изображении. Первоначальная визуализация патологических изменений проводилась двумя врачами-рентгенологами со стажем в кардиоторакальной визуализации 8 и 10 лет. При наличии их консенсуса, результаты принимались за «корректные» и затем использовались в качестве ключа.

В связи с тем, что трактовка результатов КТ-исследований сопряжена с субъективной оценкой изменений врачом-рентгенологом, а также с тем, что различные патологические изменения имеют разную значимость для ведения пациента и назначения лечения расхождения с ключом были поделены на три группы:

1) ошибки первой категории, связанные с непознанием имеющейся значимой патологии (не определены очагово-инфильтративные изменения в легких, воспалительные изменения в средостении, несостоятельность лигатур грудины, признаки остеомиелита и др.) — критические ошибки;

2) ошибки второй категории, связанные с непознанием патологических изменений, не оказывающих влияние на ведение пациента (буллы в легочной ткани, дискателектазы, послеоперационные изменения в области оперативного вмешательства и др.) — незначимые ошибки;

3) ошибки третьей категории — расхождения, связанные с различной интерпретацией одних и тех же патологических изменений, не влияющие на ведение пациента (различная трактовка зон консолидации легочной ткани, зон по типу «матового стекла», дифференциальная диагностика между компрессионным и дискателектазом, субъективные представления ширине допустимого диастаза половин грудины и др.).

Статистический анализ. Для описания категориальных данных высчитывали абсолютные частоты и проценты от общего количества наблюдений. Обработка категориальных данных проведена с использованием таблиц частот, таблиц сопряженности, критерия χ^2 или точного критерия Фишера (при малом числе наблюдений). Достоверность различий между выборками категориальных данных определяли с использованием непараметрического теста Манна–Уитни.

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

Результаты и их обсуждение.

1. Результаты анализа патологических изменений у обследованной группы пациентов. В ходе исследования проанализированы основные патологические изменения, наблюдаемые в послеоперационном периоде после кардиохирургических вмешательств при КТ у обследованной группы пациентов. Результаты анализа представлены в табл. 4.

Проведена оценка средних значений дозовых характеристик пациентов в контрольной и экспериментальной выборках. Результаты оценки представлены в табл. 5.

Данные табл. 5 соответствуют результатам выполненных ранее работ. Использование экспериментального протокола 1 позволяет снизить дозу пациента на 100%, экспериментального протокола 2 — на 200% [1]. Суммарная доза (низкодозовый + ульт-

раникодозовый протоколы сканирования), полученная пациентами в экспериментальной выборке, оставалась ниже, чем при сканировании с использованием стандартного протокола.

2. Анализ ошибок при интерпретации КТ-изображений. В ходе оценки диагностической значимости изображений были проанализированы результаты анализа КТ-исследований врачей-рентгенологов на соответствие имеющемуся ключу. В таблице 6 представлено распределение случаев ошибочной интерпретации результатов КТ.

Регистрируемые в ходе эксперимента ошибки первой категории представляли собой пропуск очагово-инфильтративных изменений в легких. При использовании стандартного и низкодозового протоколов не наблюдается наличия ошибок первой категории вне зависимости от используемого метода реконструкции. При применении ультраникодозового протокола сканирования отмечается появление таких ошибок как для изображений, полученных с использованием протокола IMR, так и для протокола iDose. При этом отмечается двукратное преобладание количества таких ошибок для протокола iDose над IMR.

Ошибки второй категории были представлены в основном пропуском зон повышенное пневматизации, воздушных булл. По ошибкам второй категории для изображений, полученных с помощью алгоритма реконструкции iDose, достоверных различий нет для всех трех протоколов сканирования. Для изображений, полученных с применением алгоритма IMR, отмечено резкое увеличение числа ошибок второй категории на ультраникодозовом протоколе по сравнению со стандартным и низкодозовым протоколами сканирования.

Ошибки третьей категории проявлялись в различной трактовке врачами-рентгенологами одних и тех же визуализируемых изменений. Количество ошибок третьей категории для реконструкций iDose достаточно высоко и не зависит от протокола сканирования. Для алгоритма реконструкции IMR таких ошибок для стандартного и низкодозового протоколов значительно меньше. Между этими протоколами отсутствуют достоверные различия. При выборе ультраникодозового сканирования для алгоритма IMR количество расхождений увеличивается, но при этом остается сопоставимым с данными, полученными при использовании алгоритма реконструкции iDose.

Представленные данные свидетельствуют об отсутствии значимых различий между стандартным и низкодозовым протоколами для всех методов реконструкции. Достоверность полученных результатов ограничена в связи с малой выборкой пациентов. Работы в этом направлении будут продолжены. Примеры ошибок представлены на рис. 1–3.

Пример сравнения визуализации патологических изменений (очаг по типу «матового стекла» в верхней доле правого легкого) на различных протоколах сканирования представлен на рис. 4.

Таблица 4

Структура патологических изменений, определяемых у обследованной группы пациентов

Table 4

The structure of pathological findings identified in the examined patient group

Изменения, определяемые у пациентов по КТ	Количество	
	абс.	%
Очагово-инфильтративные изменения в легких	16	16,7
Локальные зоны сниженной пневматизации (консолидация, зоны по тип матового стекла)	5	5,2
Компрессионные ателектазы	41	42,7
Линейные, ретикулярные изменения (дискателектазы, утолщение междолькового интерстция)	47	49,0
Зоны повышенной воздушности (буллы, эмфизема)	8	8,3
Жидкостные скопления (плевральный выпот)	63	65,6
Скопления жидкости в полости перикарда, перипротезные скопления жидкости	28	29,2
Отек ретростеральной/подкожной клетчатки, жидкостные скопления	96	100,0
Ретростеральные включения воздуха/газа	26	27,1
Ретростеральная гематома	53	55,2
Воспалительные инфильтраты в подкожно-жировой клетчатке в зоне оперативного вмешательства	1	1,0
КТ-признаки медиастинита	2	2,1
Несостоятельность лигатур грудины, дигисценция	4	4,2
Диастаз половин грудины	9	9,4
Другое (лимфоаденопатия, солидные очаги и др)	14	14,6
Переломы ребер	30	31,3

Таблица 5

Дозовые характеристики использованных протоколов сканирования

Table 5

Dose characteristics of the surveyed CT protocols

Протокол	DLP, мГр·см	Эффективная доза, мЗв
Эталонный	207±51 (131–367)	3,5±0,9 (2,2–6,2)
Низкодозовый	100±8 (73–116)	1,7±0,1 (1,2–2,0)
Ультранизкодозовый	50±4 (38–58)	0,8±0,1 (0,6–1,0)

Таблица 6

Результаты распределения ошибочных интерпретаций

Table 6

Distribution of misinterpretations

Категория ошибок	iDose			IMR		
	стандартный протокол	низкодозовый протокол	ультранизкодозовый протокол	стандартный протокол	низкодозовый протокол	ультранизкодозовый протокол
Критические ошибки (кат. А)			4			2
Некритические ошибки (кат. Б)	1	3	1	2	3	12
Расхождения в интерпретации	10	11	10	4	3	12

3. Результаты субъективной оценки качества КТ-изображения пациентов врачами-рентгенологами. Для всех трех рассмотренных параметров (общей оценки качества изображения, оценки качества визуализации нормальной анатомии и патологических изменений) вне зависимости от использованного метода реконструкции отсутствуют достоверные различия между стандартным

и низкодозовым протоколами (тест Краскелла–Уоллиса с последующим попарным сравнением выборок тестом Манна–Уитни, $p < 0,05$). При использовании ультранизкодозового протокола выборки оценок экспертов по всем трем параметрам достоверно ниже по сравнению с стандартным и низкодозовым протоколами (тест Краскелла–Уоллиса с последующим попарным сравнением выборок тестом Манна–

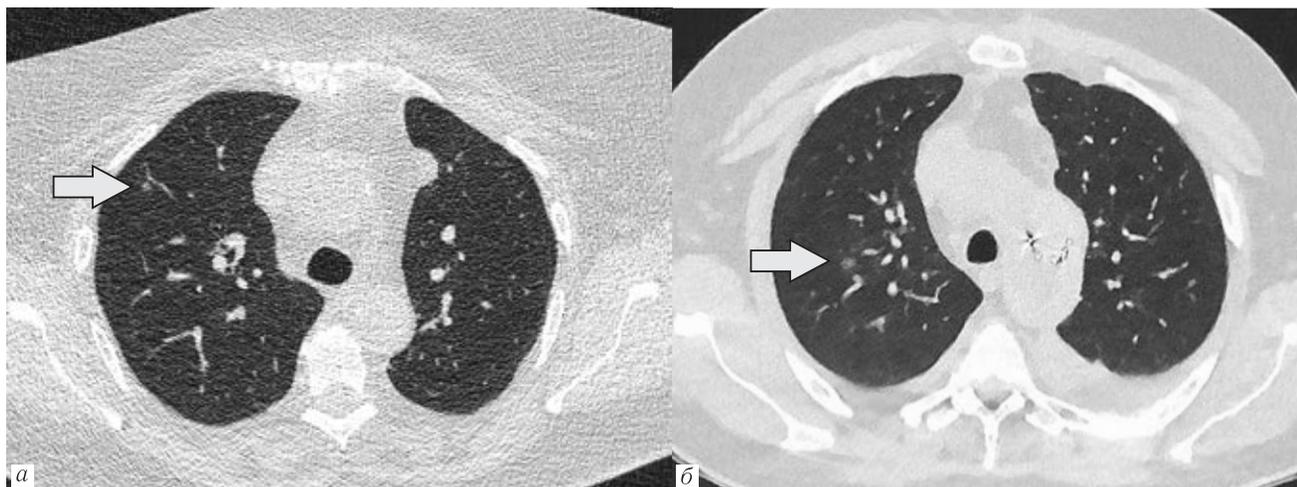


Рис. 1. Пример ошибок первой категории: *a* — пропуск немногочисленных сгруппированных очагов по типу «матового стекла», вероятно воспалительного генеза в верхней доле правого легкого (4 врача из 5), ультранизкодозовый протокол, реконструкция iDose; *б* — пропуск аналогичных очагов в верхней, средней долях правого легкого (2 врача из 5), ультранизкодозовый протокол, реконструкция IMR. Патологические изменения указаны стрелками

Fig. 1. An example of the first category misinterpretations: *a* — skipping sparse «ground glass» lesions, probably of inflammatory origin in the upper lobe of the right lung (4 doctors out of 5), ultra-low-dose protocol, iDose reconstruction; *b* — skipping similar lesions in the upper, middle lobes of the right lung (2 doctors out of 5), ultra-low-dose protocol, IMR reconstruction. Pathological changes are indicated by arrows

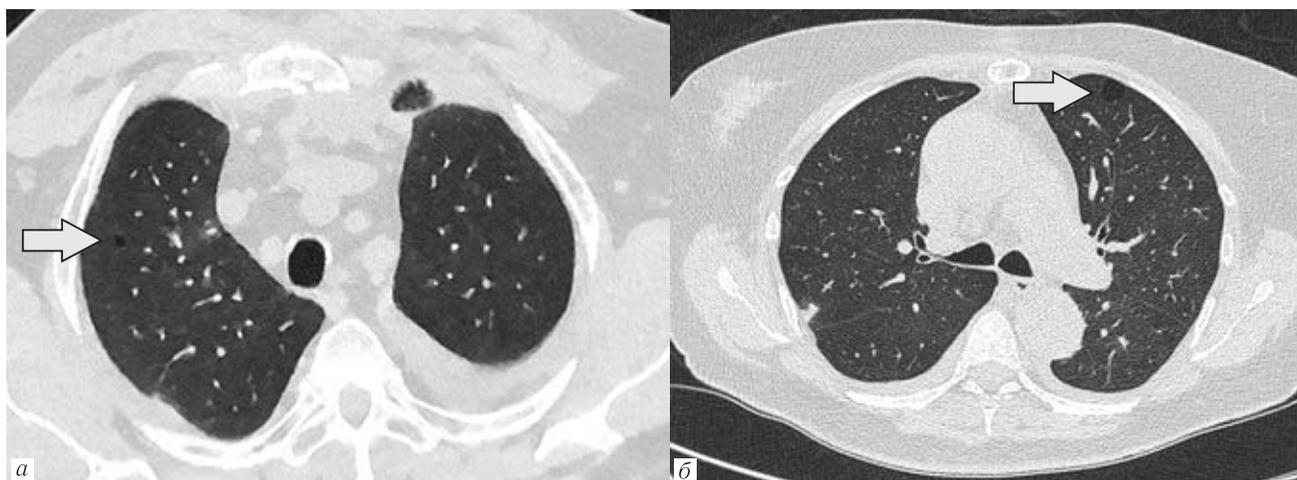


Рис. 2. Примеры ошибок второй категории: *a* — пропуск буллы в верхней доле правого легкого (2 врача из 4); низкодозовый протокол, реконструкция IMR; *б* — пропуск буллы в верхней доле левого легкого (1 врач из 4); стандартный протокол, реконструкция iDose. Патологические изменения указаны стрелками

Fig. 2. Examples of the second category misinterpretations: *a* — skipping a bulla in the upper lobe of the right lung (2 doctors out of 4); low-dose protocol, IMR reconstruction; *b* — skipping a bulla in the upper lobe of the left lung (1 doctor out of 4); standard protocol, iDose reconstruction. Pathological changes are indicated by arrows

Уитни, $p < 0,05$). Данное обстоятельство позволяет судить о приемлемости использования низкодозового протокола в качестве альтернативы стандартному. Ультранизкодозовый протокол по результатам оценок не может быть рекомендован в качестве альтернативы стандартному в связи с большим количеством неприемлемых оценок. Результаты анализа оценки качества изображения представлены на рис. 5–7.

Отсутствуют достоверные различия между стандартным и низкодозовым протоколами для всех методов реконструкции. Ультранизкодозовый протокол достоверно отличается (имеет более низкие оценки) для обоих методов реконструкции.

Результаты сравнения экспертных оценок уровня шума на представленных изображениях представлены на рис. 8 и 9 для легочного и мягкотканного окон соответственно.

Как и в предыдущем случае, отсутствуют достоверные различия между стандартным и низкодозовым протоколами для всех методов реконструкции. Ультранизкодозовый протокол достоверно отличается (имеет более низкие оценки) для обоих методов реконструкции.

Результаты сравнения значений общей экспертной характеристики КТ-изображения (применительно к уверенности в заключении) представлено на рис. 10.

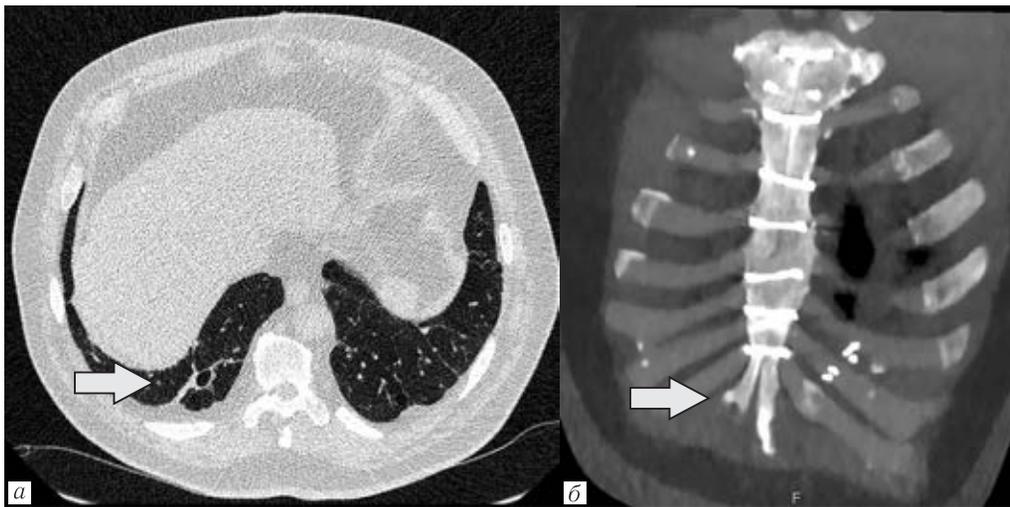


Рис. 3. Примеры ошибок третьей категории: *a* — трактовка участка ателектазированной легочной ткани в нижней доле справа как зоны линейного дискателектаза (1 врач из 4); ультранизкодозовый протокол, реконструкция IMR; *б* — трактовка расстояния между половинами грудины на уровне мечевидного отростка как значимого диастаза (1 врач из 4); ультранизкодозовый протокол, реконструкция IMR. Патологические изменения указаны стрелками
Fig. 3. Examples of the third category misinterpretations: *a* — interpretation of a site of atelectatic lung tissue in the lower lobe on the right as a zone of linear discatelectasis (1 doctor out of 4); ultra-low-dose protocol, IMR reconstruction; *б* — interpretation of the distance between the halves of the sternum at the level of the xiphoid process as a significant diastasis (1 doctor out of 4); ultra-low-dose protocol, IMR reconstruction. Pathological changes are indicated by arrows

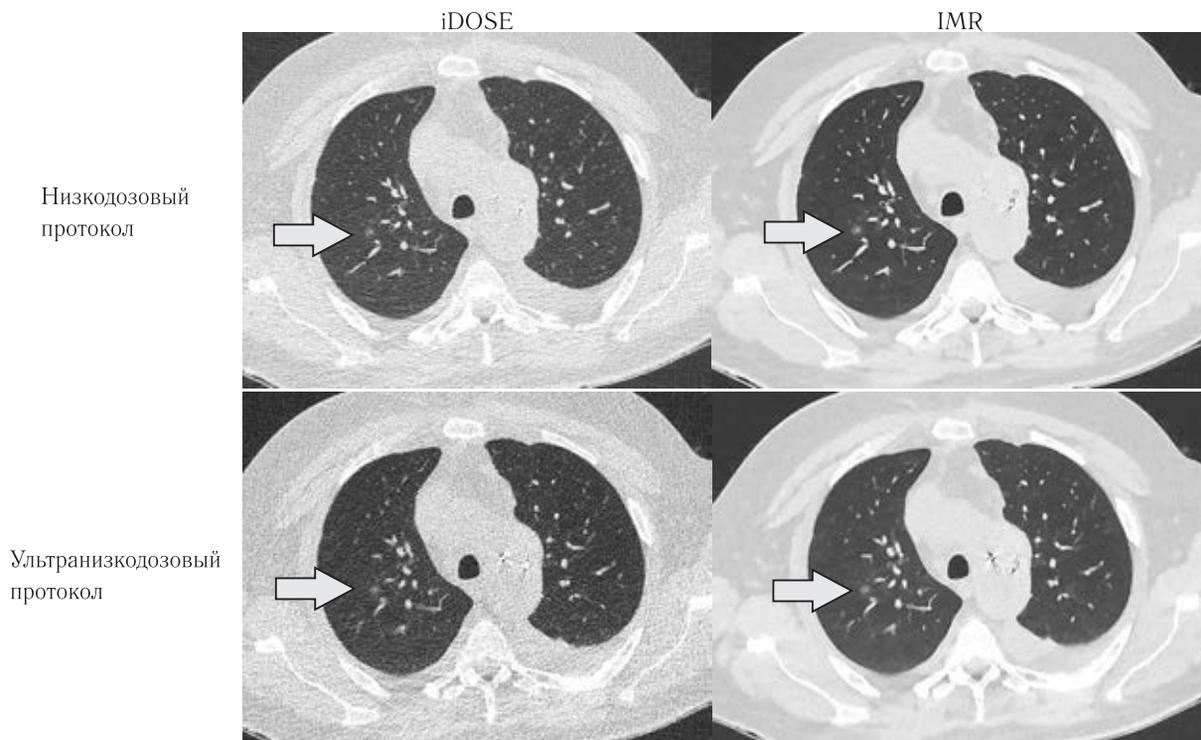


Рис. 4. КТ-срезы на уровне очага по типу «матового стекла» в верхней доле правого легкого, полученные на разных уровнях дозы и с применением различных алгоритмов итеративных реконструкций. Обращает на себя внимание более четкое отображение очага при использовании низкодозового протокола по сравнению с ультранизкодозовым. При использовании алгоритма модельных итеративных реконструкций IMR очаг визуализируется значительно более отчетливо

Fig. 4. CT scans at the level of the ground-glass lesion in the upper lobe of the right lung obtained at different dose levels and using different algorithms of iterative reconstruction. The lesion has better visualization on the low-dose protocol compared to the ultra-low-dose protocol. When using the algorithm of model iterative IMR reconstructions, the lesion is visualized significantly more clearly

Для общей выборки и метода реконструкции IMR отсутствуют достоверные различия между стандартным и низкодозовым протоколами; ультранизкодозовый протокол достоверно отличается от стандарт-

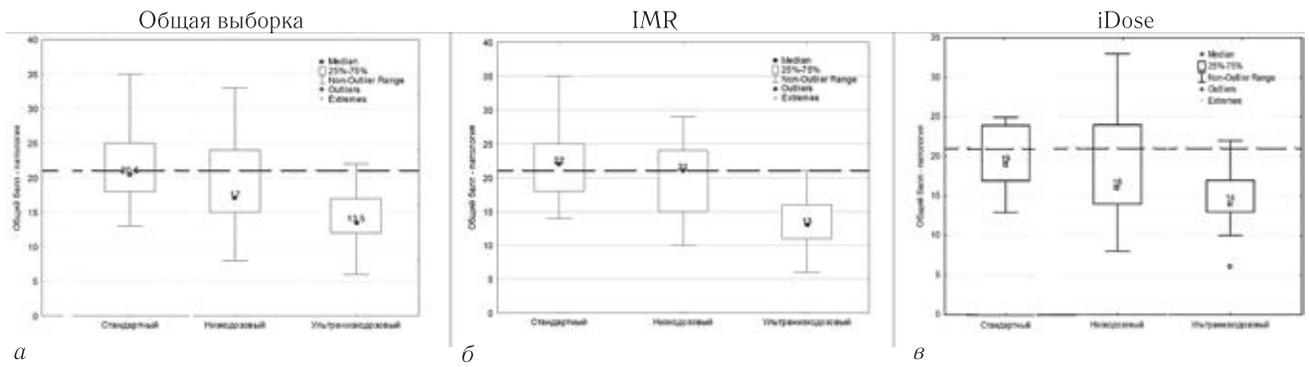


Рис. 5. Сравнение оценки качества визуализации патологических изменений между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции iDose. Сравнение проводилось по сумме баллов за визуализацию патологических изменений. Пунктирной линией отмечен порог приемлемых значений — 21 балл

Fig. 5. Comparison of the assessment of the quality of visualization of pathological changes between the standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images processed using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images processed using the iDose reconstruction algorithm. The comparison was performed based on the sum of scores for visualization of pathological changes. The dotted line marks the threshold of acceptable score — 21 points

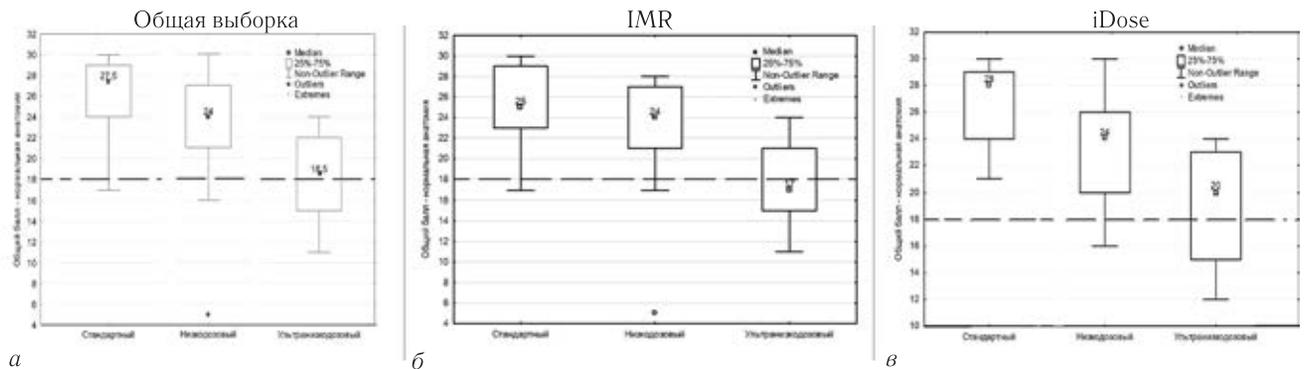


Рис. 6. Сравнение оценки качества визуализации нормальной анатомии между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции iDose. Сравнение проводилось по сумме баллов за визуализацию нормальной анатомии. Пунктирной линией отмечен порог приемлемых значений — 18 баллов

Fig. 6. Comparison of the assessment of the quality of visualization of normal anatomy between standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images processed using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images processed using the iDose reconstruction algorithm. The comparison was performed based on the sum of scores for visualization of normal anatomy. The dotted line marks the threshold of acceptable scores — 18 points

ного и низкодозового протоколов (оценки экспертов достоверно ниже). Для метода реконструкции iDose достоверно различаются оценки между всем тремя протоколами. Значения с баллами 3 и выше считались приемлемыми для применения в клинической практике.

Отдельные аномально низкие оценки различных параметров качества изображения (см. предыдущие рисунки) в том числе и для КТ-изображений, выполненных на стандартных протоколах, могут быть объяснены наличием в выборке большого числа пациентов с избыточной массой тела (ИМТ более 25 кг/м²).

Для подтверждения данной гипотезы было проведено сравнение всех критериев качества изображений для выборок пациентов с нормальной (ИМТ ≤ 25 кг/м²) и избыточной (ИМТ > 25 кг/м²) массой тела (попарное

сравнение тестом Манна–Уитни). Результаты сравнения представлены в табл. 7.

Результаты, представленные в табл. 7–9, показывают, что достоверно более низкое качество изображения наблюдалось у пациентов с избыточной массой тела при сканировании на низкодозовом и ультранизкодозовом протоколах с применением метода реконструкции iDose. Для метода реконструкции IMR достоверные различия между пациентами с нормальной и избыточной массой тела для всех протоколов отсутствуют.

Число диагностически неприемлемых изображений растет с переходом от стандартного к низкодозовому и ультранизкодозовому протоколам. При этом достоверные различия между стандартным и низкодозовыми протоколами наблюдались только

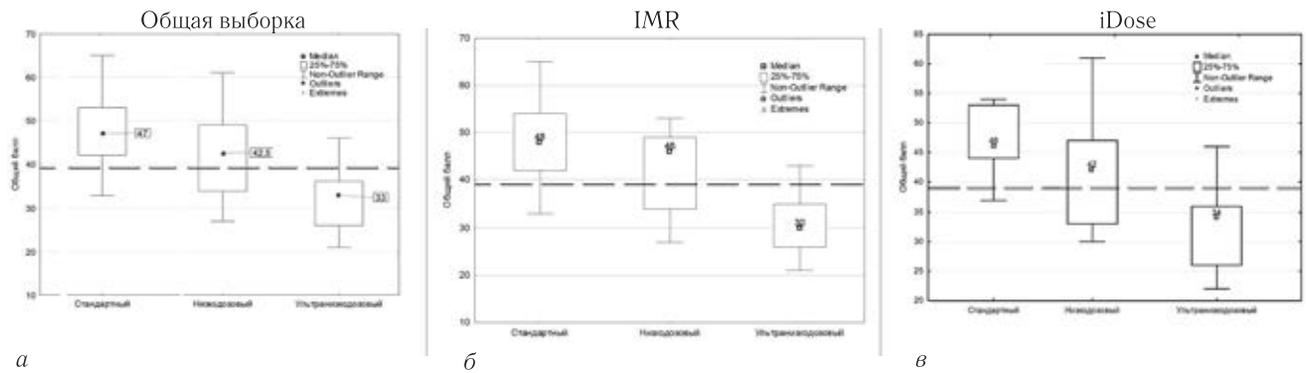


Рис. 7. Сравнение общей оценки качества изображения между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции iDose. Сравнение проводилось по сумме баллов за визуализацию нормальной анатомии и патологических изменений. Пунктирной линией отмечен порог приемлемых значений — 39 баллов

Fig. 7. Comparison of the overall assessment of image quality between standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images processed using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images processed using the iDose reconstruction algorithm. The comparison was performed based on the sum of scores for visualization of normal anatomy and pathological changes. The dotted line marks the threshold of acceptable scores — 39 points

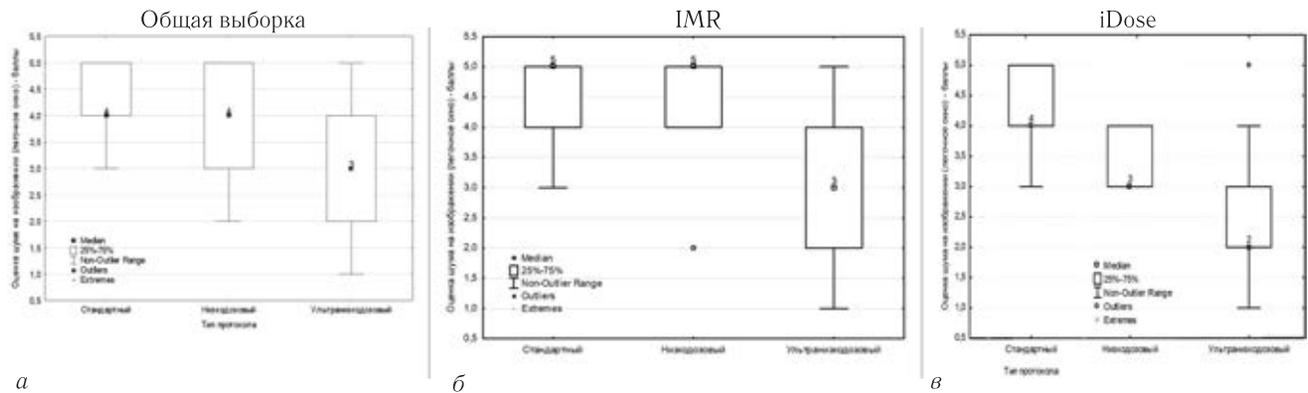


Рис. 8. Сравнение уровня шума в легочном окне между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции iDose. Значения с баллами 3 и выше считались приемлемыми для применения в клинической практике

Fig. 8. Comparison of noise level in the lung-window between standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images processed using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images processed using the iDose reconstruction algorithm. Values with scores of 3 and above were considered acceptable for use in clinical practice

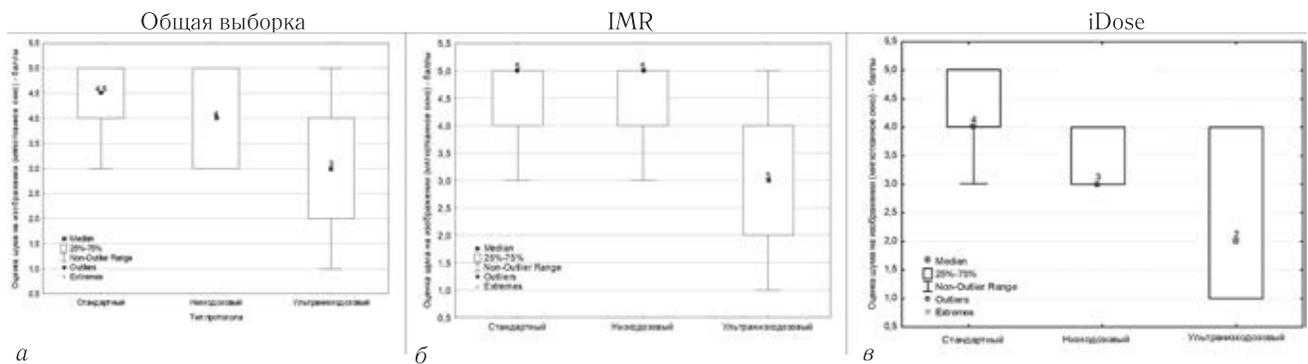


Рис. 9. Сравнение уровня шума в мягкотканном окне между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, обработанных с помощью алгоритма реконструкции iDose. Значения с баллами 3 и выше считались приемлемыми для применения в клинической практике

Fig. 9. Comparison of noise level in mediastinal window between standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images processed using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images processed using the iDose reconstruction algorithm. Values with scores of 3 and above were considered acceptable for use in clinical practice

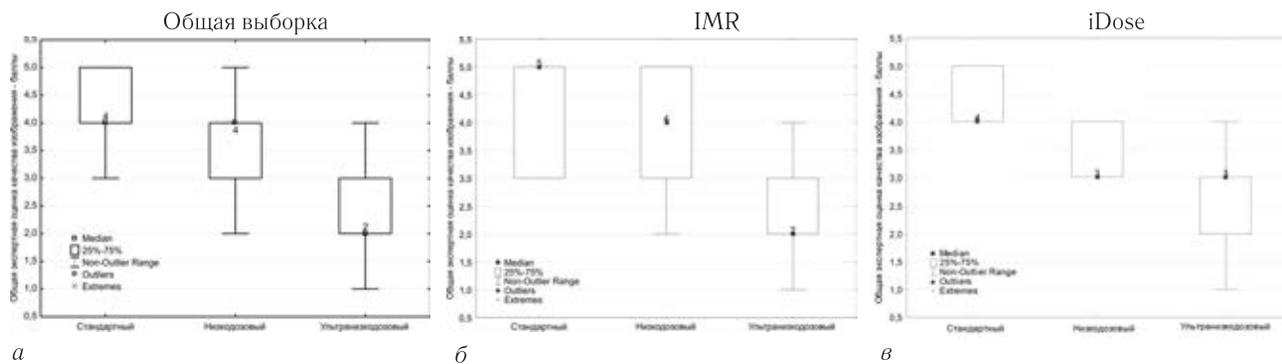


Рис. 10. Сравнение уровня шума в мягкотканном окне между стандартным и низкодозовыми протоколами для: *a* — общей выборки изображений; *б* — изображений, полученных с помощью алгоритма реконструкции IMR; *в* — изображений, полученных с помощью алгоритма реконструкции iDose

Fig. 10. Comparison of the noise level in the soft tissue window between standard and low-dose protocols for: *a* — total sample of images; *б* — images obtained using the IMR reconstruction algorithm; *в* — images obtained using the iDose reconstruction algorithm

Таблица 7

Сравнение медианных баллов для всех критериев качества изображений для пациентов с нормальной и избыточной массой тела для стандартного протокола КТ сканирования*

Table 7

Comparison of median scores for all image quality criteria for normal and overweight patients for a standard CT scan protocol*

Критерий	IMR				iDose			
	нормостеники		гиперстеники		нормостеники		гиперстеники	
	медианный балл	число диагностически неприемлемых изображений						
Оценка шума на изображении (легочное окно)	5		5		4		4	
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	5		5		5		4	
Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	5		4		4		4	
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	54		47	2	47	1	46	
Общий балл — патология	25	2	22	4	22	5	19	4
Общий балл — нормальная анатомия	29	1	24	1	29	4	27	

* Полужирным курсивом отмечены ячейки, для которых наблюдались достоверные различия между выборками пациентов с нормальной и избыточной массой тела (тест Манна-Уитни, $p < 0,05$).

* Bold italics mark cells with significant differences between samples of patients with normal and over-weight (Mann-Whitney test, $p < 0,05$).

по общему баллу на изображение. Следует отметить, что число диагностически неприемлемых изображений по параметру визуализации патологиче-

ских структур практически одинаково для стандартного и низкодозового протоколов для обоих методов реконструкции.

Таблица 8

Сравнение медианных баллов для всех критериев качества изображений для пациентов с нормальной и избыточной массой тела для низкодозового протокола КТ сканирования*

Table 8

Comparison of median scores for all image quality criteria for normal and overweight patients for a low-dose CT scan protocol*

Критерий	IMR				iDose			
	нормостеники		гиперстеники		нормостеники		гиперстеники	
	медианный балл	число диагностически неприемлемых изображений						
Оценка шума на изображении (легочное окно)	5		5	1	3		3	
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	5		3		4		3	
Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	5		4		3		3	
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	46	4	40	2	50		35	7
Общий балл — патология	22	4	17	3	24	1	15	9
Общий балл — нормальная анатомия	25	3	23	3	28	1	24	9

* Полу жирным курсивом отмечены ячейки, для которых наблюдались достоверные различия между выборками пациентов с нормальной и избыточной массой тела (тест Манна-Уитни, $p < 0,05$).

* Bold italics mark cells with significant differences between samples of patients with normal and over-weight (Mann-Whitney test, $p < 0,05$).

Таким образом, результаты исследования позволяют рекомендовать низкодозовый протокол в качестве альтернативы стандартному с предпочтительным использованием метода реконструкции IMR.

Таблица 9

Сравнение медианных баллов для всех критериев качества изображений для пациентов с нормальной и избыточной массой тела для ультранизкодозового протокола КТ-сканирования*

Table 9

Comparison of median scores for all image quality criteria for normal and overweight patients for an ultra-low-dose CT scan protocol*

Критерий	IMR				iDose			
	нормостеники		гиперстеники		нормостеники		гиперстеники	
	медианный балл	число диагностически неприемлемых изображений						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оценка шума на изображении (легочное окно)	4	1	3	4	3	3	2	5
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	4	1	3	5	3	3	1	5

Окончание таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	3	2	2	7	3	3	2	4
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	35	3	30	9	36	7	26	5
Общий балл — патология	15	4	13	9	16	9	12	5
Общий балл — нормальная анатомия	20	4	16	9	21	8	13	5

* Полужирным курсивом отмечены ячейки, для которых наблюдались достоверные различия между выборками пациентов с нормальной и избыточной массой тела (тест Манна-Уитни, $p < 0,05$).

* Bold italics mark cells with significant differences between samples of patients with normal and over-weight (Mann-Whitney test, $p < 0,05$).

Примеры КТ-изображений в легочном и мягкотканном окнах для нормостеников и гиперстеников, полученные стандартном и низкодозовых протоколах, представлены на рис. 11.

Также была выполнена оценка корреляции между оценками качества изображения по сумме баллов (нор-

мальная анатомия, патологические изменения и весь набор параметров) и экспертными оценками уровней шума и качества изображения. Результаты сравнения в виде значений коэффициентов корреляции Спирмена представлены в табл. 10–12 для общей выборки и методов реконструкции IMR и iDose соответственно.

Таблица 10

Корреляционная зависимость различных параметров оценки качества изображения для общей выборки*

Table 10

Correlation between various factors of image quality for the total patient sample*

Критерий	Оценка шума на изображении (легочное окно)	Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	Общий балл (патология + нормальная анатомия)	Общий балл — патология	Общий балл — нормальная анатомия
Оценка шума на изображении (легочное окно)	1	0,83	0,75	0,55	0,47	0,53
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	0,83	1	0,71	0,53	0,44	0,51
Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	0,75	0,71	1	0,8	0,67	0,78
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	0,55	0,53	0,8	1	0,87	0,87
Общий балл — патология	0,47	0,44	0,67	0,87	1	0,55
Общий балл — нормальная анатомия	0,53	0,51	0,78	0,87	0,55	1

* Полужирным курсивом отмечены статистически достоверные ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции.

* Bold italics mark cells with significant ($p < 0,05$) correlation coefficients.

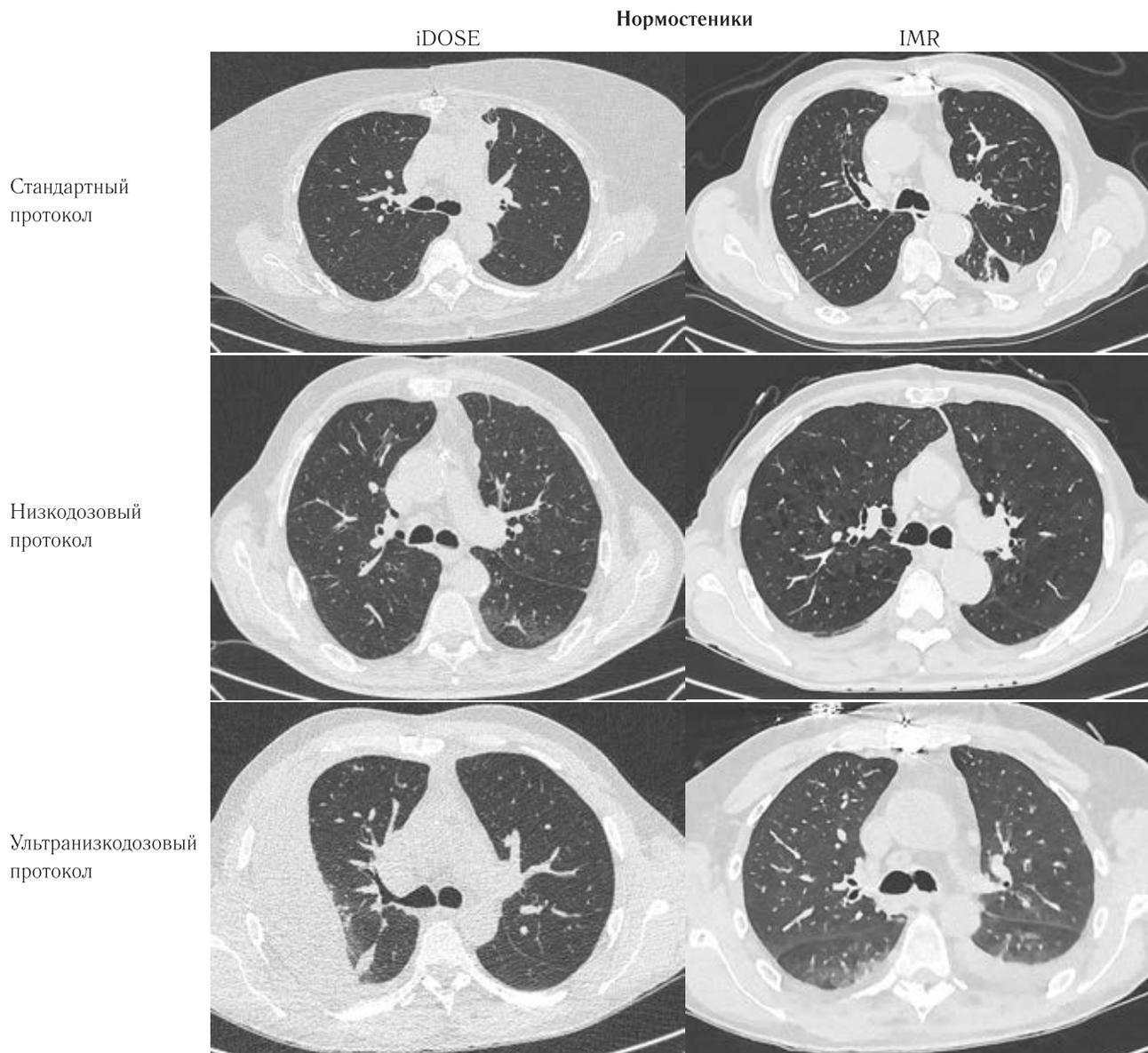


Рис. 11. КТ-изображения в легочном окне, полученные на стандартном и низкодозовых протоколах с применением реконструкций iDose и IMR для пациентов с нормальной и избыточной массой тела

Таблица 11

Корреляционная зависимость различных параметров оценки качества изображения для выборки изображений, полученных с применением метода реконструкции IMR*

Table 11

Correlation between various factors of image quality for the sample of images obtained using the IMR reconstruction method*

Критерий	Оценка шума на изображении (легочное окно)	Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	Общий балл (патология + щднормальная анатомия)	Общий балл — патология	Общий балл — нормальная анатомия
1	2	3	4	5	6	7
Оценка шума на изображении (легочное окно)	1	0,78	0,72	0,54	0,5	0,52
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	0,78	1	0,62	0,37	0,3	0,42
Общая экспертная оценка качества изображения (применительно)	0,72	0,62	1	0,84	0,78	0,8

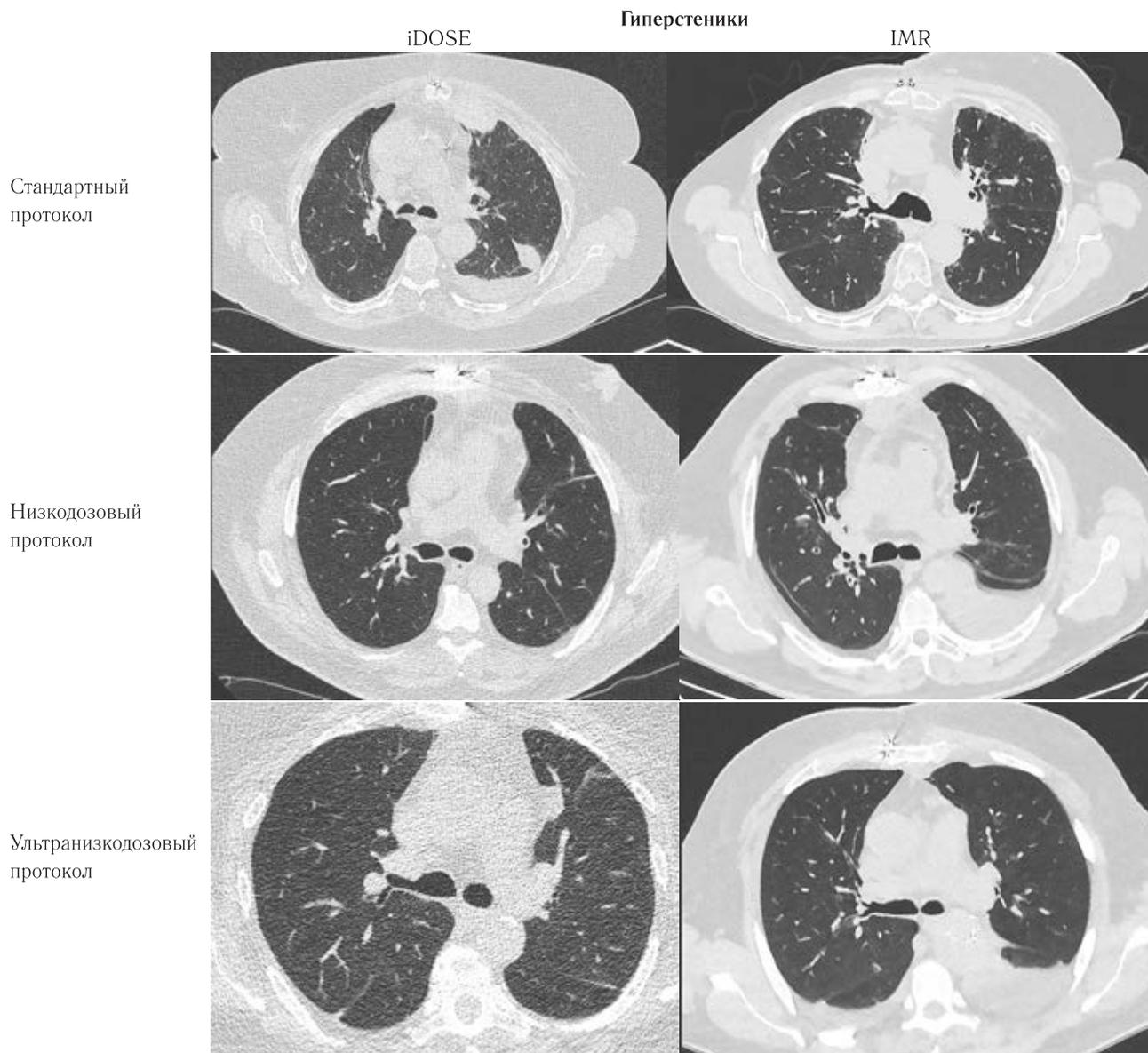


Fig. 11. CT images in the pulmonary window obtained on standard and low-dose protocols using iDose and IMR reconstructions for patients with normal and overweight

Окончание таблицы 11

1	2	3	4	5	6	7
к уверенности в заключении)						
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	0,54	0,37	0,84	1	0,89	0,91
Общий балл — патология	0,5	0,3	0,78	0,89	1	0,64
Общий балл — нормальная анатомия	0,52	0,42	0,8	0,91	0,64	1

* Полужирным курсивом отмечены статистически достоверные ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции.

* Bold italics mark cells with significant ($p < 0,05$) correlation coefficients.

Представленные в таблицах результаты указывают на достоверно высокий уровень положительной корреляции для всех использованных критериев качества изображения. Наибольшие значения коэффициента корреляции Спирмена были получены для общей экспертной оценки качества изображения и всех параметров, кроме оценки патологических

изменений, что позволяет при необходимости использовать более простые методы экспертной оценки качества КТ-изображения (общая экспертная оценка качества изображения применительно к уверенности в заключении вместо более сложной оценки отдельных патологических структур и структур нормальной анатомии).

Таблица 12

Корреляционная зависимость различных параметров оценки качества изображения для выборки изображений, полученных с применением метода реконструкции iDose*

Table 12

Correlation between various factors of image quality for the sample of images obtained using the iDose reconstruction method*

Критерий	Оценка шума на изображении (легочное окно)	Оценка шума на изображении (мягкотканное окно)	Общая экспертная оценка качества изображения (применительно к уверенности в заключении)	Общий балл (патология + нормальная анатомия)	Общий балл — патология	Общий балл — нормальная анатомия
1	2	3	4	5	6	7
Оценка шума на изображении (легочное окно) — баллы	1	0,85	0,87	0,65	0,46	0,72
Оценка шума на изображении (мягкотканное окно) — баллы	0,85	1	0,85	0,75	0,6	0,7
Общая экспертная оценка качества изображения — баллы	0,87	0,85	1	0,74	0,52	0,79
Общий балл (патология + нормальная анатомия)	0,65	0,75	0,74	1	0,86	0,83
Общий балл — патология	0,46	0,6	0,52	0,86	1	0,47
Общий балл — нормальная анатомия	0,72	0,7	0,79	0,83	0,47	1

* Полужирным курсивом отмечены статистически достоверные ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции.

* Bold italics mark cells with significant ($p < 0,05$) correlation coefficients.

Ограничение исследования. В выборку было включено малое число пациентов, что может сказаться на достоверности статистических результатов. Количество врачей также было ограничено ввиду сложности в проведении эксперимента. Недостатки представленной методики оценки качества связаны в первую очередь с большими временными и трудовыми затратами на исследование. При проведении этого исследования было изначально принято допущение, что все оцениваемые параметры были одинаково значимы, что не соответствует реальной клинической практике.

Выводы. По результатам анализа ошибок и по представленным данным анализа субъективных оценок можно сделать вывод о приемлемости применения разработанного низкодозового протокола в клинической практике, что приводит к значимому (в 2 раза) снижению облучения пациентов ИИ без потерь в диагностическом качестве изображения. Ультранизкодозовый протокол не рекомендован для клинического применения для обоих методов реконструкции изображений ввиду значимо большего количества ошибок при анализе, а также неудовлетворительных экспертных оценок качества изображений.

Однако следует учесть, что данные настройки подходят преимущественно для пациентов с нормальным и гипостеничным телосложением. Возможности их применения для пациентов с избыточной массой тела должны быть дополнительно оценены.

Разработанная методика оценки качества КТ-изображения зарекомендовала себя как информативной и воспроизводимой и может быть использована для разработки новых протоколов сканирования. Применение комплексной оценки представленных параметров позволяет обеспечить высокую диагностическую значимость низкодозовых протоколов. Однако данная методика требует значительных временных и трудовых затрат. При необходимости можно использовать более простые методы экспертной оценки качества КТ-изображения (общая экспертная оценка качества изображения применительно к уверенности в заключении вместо более сложной оценки отдельных патологических структур и структур нормальной анатомии). Хорошая корреляционная зависимость всех параметров оценки качества изображения с общей оценкой изображения врачом-рентгенологом позволяет при необходимости упростить методику оценки качества без значимой потери достоверности результатов, что может быть актуальным в рамках клинического аудита или внутреннего контроля качества в отделениях КТ-диагностики.

Достоверных различий в оценках изображений для методов реконструкции iDose и IMR не выявлен, оба метода могут быть рекомендованы для использования для применения в низкодозовом протоколе. Однако, учитывая более высокие оценки уровня шума в мягкотканном окне для низкодозового протокола с применением реконструкций IMR, а также

отсутствие достоверных различий в оценках для метода IMR между пациентами с нормальной и избыточной массой тела, реконструкции IMR являются более предпочтительными для использования.

Более детально влияние протоколов КТ-изображения на отдельные параметры изображений будут рассмотрены в следующей работе.

Заключение. Предложенные низкодозовые протоколы могут быть рекомендованы для клинического применения для проведения КТ органов грудной клетки для пациентов без избыточной массы тела, кото-

рым требуется неоднократное проведение КТ-исследований. Данные протоколы пока не рекомендованы для применения пациентам с избыточной массой тела. Ультранизкодозовые протоколы не рекомендованы для применения для всех групп пациентов.

* * *

Благодарности. Авторы выражают благодарность врачам-рентгенологам отдела лучевой диагностики ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, принявшим участие в исследовании.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Беркович Г.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Силин А.Ю., Каратетский А.А., Труфанов Г.Е. Оптимизация низкодозового протокола сканирования органов грудной клетки в диагностике очагов по типу «матового стекла» с применением алгоритмов итеративных реконструкций // *Лучевая диагностика и терапия*. 2019. № 4. С. 20–32. [Berkovich G.V., Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Silin A.Y., Karatetskiy A.A., Trufanov G.E. Optimization of low-dose chest CT protocols for the evaluation of the ground glass nodules using different iterative reconstruction algorithms. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2019, No. 4, pp. 20–32 (In Russ.)]. doi: 10.22328/2079-5343-2019-10-4-20-32.
2. Беркович Г.В., Чипига Л.А., Водоватов А.В., Труфанов Г.Е. Сравнение различных подходов к оценке диагностического качества компьютерной томографии органов грудной клетки // *Лучевая диагностика и терапия*. 2020. Т. 11, № 3. С. 44–55. [Berkovich G.V., Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Trufanov G.E. Comparison of different approaches to the diagnostic image quality assessment for the chest computed tomography. *Diagnostic radiology and radiotherapy*. 2020. Vol. 11, No. 3, pp. 44–55 (In Russ.)]. doi: 10.22328/2079-5343-2020-11-3-44-55.
3. ACR CT аккредитационный фантом для компьютерной томографии. Руководство по эксплуатации. Научно-производственное предприятие «Доза». [ACR CT accreditation phantom. User manual (In Russ.)].
4. Чипига Л.А. Исследование программ автоматической модуляции силы тока для оптимизации протоколов сканирования в компьютерной томографии // *Радиационная гигиена*. 2019. Т. 12, № 1. С. 104–114. [Chipiga L.A. Evaluation of tube current modulation programs for the optimization of scan protocols in computed tomography. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019, Vol. 12, No. 1, pp. 104–114 (In Russ.)].
5. Martin C.J. The importance of radiation quality for optimisation in radiology // *Biomed. Imaging. Interv. J.* 2007. Vol. 3, No. 2. P. e38.
6. Kalender W.A. Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications. 3rd rev. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 220 p.
7. Yu L. et al. Radiation dose reduction in computed tomography: techniques and future perspective // *Imaging Med.* 2009. Vol. 1, No. 1. P. 65–84.
8. Quality assurance programme for computed tomography: diagnostic and therapy applications. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012.
9. Hyun W.G. CT Radiation Dose Optimization and Estimation: an Update for Radiologists // *Korean J. Radiol.* 2012. Vol. 13, No. 1. P. 1–11.
10. Samei E. et al. Medical Imaging Dose Optimization from Ground up: Expert Opinion of an International Summit // *J. Radiol. Prot.* 2018. Vol. 38, No. 3. P. 967–989.
11. Kim H.J. et al. Ultra-Low-Dose Chest CT in Patients with Neutropenic Fever and Hematologic Malignancy: Image Quality and Its Diagnostic Performance // *Cancer Res. Treat.* 2014. Vol. 46, No. 4. P. 393–402. doi: 10.4143/crt.2013.132. Epub 2014 Jul 18. PMID: 25308150; PMCID: PMC4206072.
12. Udayasankar U.K. et al. Acute abdominal pain: value of non-contrast enhanced ultra-low-dose multi-detector row CT as a substitute for abdominal radiographs // *Emerg. Radiol.* 2009. Vol. 16. P. 61–70 [PubMed][Google Scholar].
13. Zhang M. et al. Screening for lung cancer using sub-millisievert chest CT with iterative reconstruction algorithm: image quality and nodule detectability // *Brit. J. Radiol.* 2018. Vol. 91, No 1090. P. 20170658. doi: 10.1259/bjr.20170658. Epub 2017 Dec 5. PMID: 29120665; PMCID: PMC6350471.
14. National Lung Screening Trial Research Team, Aberle D.R., Berg C.D. et al. The National Lung Screening Trial: overview and study design // *Radiology*. 2011. Vol. 258. P. 243Y253.
15. Katsura M. et al. Model-based iterative reconstruction technique for ultralow-dose chest CT: comparison of pulmonary nodule detectability with the adaptive statistical iterative reconstruction technique // *Invest Radiol.* 2013. Vol. 48, No. 4. P. 206–212. doi: 10.1097/RLI.0b013e31827ec3a. PMID: 23344517.
16. McDermott S., Kalra M.K. Low-Dose Computed Tomography for Lung Cancer Screening: The Protocol and The Dose // *Semin Roentgenol.* 2017. Vol. 52, No. 3. P. 132–136. doi: 10.1053/j.ro.2017.06.002. Epub 2017 Jun 3. PMID: 28734394.
17. Larke F.J. et al. Estimated radiation dose associated with low-dose chest CT of average-size participants in the National Lung Screening Trial // *AJR Am. J. Roentgenol.* 2011. Vol. 197, No. 5. P. 1165–1169. doi: 10.2214/AJR.11.6533. PMID: 22021510.
18. Bhalla A.S. et al. Imaging protocols for CT chest: A recommendation // *Indian J. Radiol Imaging.* 2019. Vol. 29, No. 3. P. 236–246. doi: 10.4103/ijri.IJRI_34_19. Epub 2019 Oct 30. PMID: 31741590; PMCID: PMC6857267.

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 27.03.2021 г.

Вклад авторов:

Вклад в концепцию и план исследования — Г.В.Беркович, В.А.Водоватов. Вклад в сбор данных — Г.В.Беркович, В.А.Водоватов, Л.А.Чипига. Вклад в анализ данных и выводы — В.А.Водоватов. Вклад в подготовку рукописи — В.А.Водоватов, Г.Е.Труфанов.

Сведения об авторах:

Беркович Глеб Владимирович — заведующий кабинетом рентгеновской компьютерной томографии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А.Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: glebberkovich@gmail.com; ORCID 0000–0002–7077–7320;

Водоватов Александр Валерьевич — заведующий лабораторией радиационной гигиены медицинских организаций федерального государственного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В.Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; e-mail: vodovatoff@gmail.com; ORCID 0000–0002–5191–7535;

Чипига Лариса Александровна — научный сотрудник федерального государственного учреждения науки «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены им. проф. П.В.Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; ORCID 0000–0001–9153–3061;

Труфанов Геннадий Евгеньевич — заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А.Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; e-mail: trufanovge@mail.ru; ORCID 0000–0002–1611–5000.