Радиология — практика. 2021. № 6.
Radioilogy — practice. 2021. No. 6.

Check for updates

ПРОДОЛЖЕННОЕ МЕДИЦИНСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Обзорная статья.
https://doi.org/10.52560/2713-0118-2021-6-43-54

Количественная оценка эмфиземы легких и корреляция результатов автоматического анализа с вентиляционной и газообменной функциями легких (обзор литературы)

Н. А. Грива*[,1], П. В. Гаврилов[1,2], Е. Г. Соколович[1,2]

[1] ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России
[2] Санкт-Петербургский государственный университет

Реферат

Количественная оценка эмфиземы является темой исследований в течение многих лет из-за трудоемкого анализа и субъективности визуальной составляющей. В последние годы появились работы, изучающие корреляционные связи автоматического анализа компьютерных томограмм с результатами функциональных легочных тестов. Ранее используемая система оценки тяжести хронической обструктивной болезни легких, основанная на индексе Тиффно, утратила самостоятельное значение, сегодня диагноз и стадию заболевания рекомендуется устанавливать с учетом частоты и тяжести обострений. Таким образом, возникла необходимость поиска более объективных критериев диагностики, одним из которых может стать автоматический анализ объема эмфиземы по данным компьютерной томографии.

Ключевые слова: компьютерная томография органов грудной клетки, хроническая обструктивная болезнь легких, эмфизема, искусственный интеллект.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов.

* **Грива Надежда Алексеевна,** аспирант ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии», Минздрава России. ГБУЗ «Ленинградская областная клиническая больница».
Адрес: 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4.
Телефон: +7 (931) 275-82-14. Электронная почта: grivamd@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-3580-8723

Griva Nadezhda Alekseevna, Postgraduate, Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of Russia. Leningrad Regional Clinical Hospital.
Address: 2-4, Ligovskiy pr., St. Petersburg, 191036, Russia.
Phone number: +7 (931) 275-82-14. E-mail: grivamd@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-3580-8723

© Н. А. Грива, П. В. Гаврилов, Е. Г. Соколович.

THE CONTINUED MEDICAL EDUCATION

Review article.

AI-based Quantification of Lung Emphysema and its Correlation with Lung Function Test Results (Literature Review)

N. A. Griva*, [1], P. V. Gavrilov[1, 2], E. G. Sokolovich[1, 2]

[1] St. Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology
[2] St. Petersburg State University

Abstract

Quantification of emphysema has been a topic of research for many years due to the time-consuming process that it requires and the subjectivity of the visual quantification of emphysema. In recent years there are a lot of studies dedicated to the comparison of automatic analysis data with the results of functional pulmonary tests. The previously used Tiffno index-based system for assessing the severity of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) has lost its independent value, so today it is recommended to establish the diagnosis and stage of the disease taking into account the frequency and severity of exacerbations. Thus, there is a need to search for more objective diagnostic criteria, which can become an AI-based emphysema quantification.

Key words: Computed Tomography of the Chest Organs, Chronic Obstructive Pulmonary Disease, Emphysema, Artificial Intelligence.

Research funding and conflict of interest

The study was not funded by any sources. The author state that this work, its theme, subject and content do not affect competing interests.

Актуальность

Сегодня искусственный интеллект (ИИ) все чаще используется в работе практикующего врача-рентгенолога. Одной из областей его применения является оценка объема эмфизематозных изменений в легких. Также в последние годы появились данные о корреляции результатов автоматического анализа компьютерных томограмм пациентов с результатами тестов функции внешнего дыхания (КИФВД).

Цель: изучить и проанализировать результаты научных исследований, посвященных возможностям количественной оценки эмфиземы легких и оценке взаимосвязей между выраженностью эмфиземы и функциональными показателями.

Эмфизема легких

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ) — это третья причина смерти во всем мире, от которой в 2019 г. умерло 3,23 млн человек [16]. В Российской Федерации, как и во всем мире, болезни органов дыхания также являются самыми распространенными. В 2019 году ими переболели более 50 млн россиян.

Новая коронавирусная инфекция, безусловно, должна пополнить статистику заболеваемости, при этом статистические данные эпидемии COVID-19 вполне сопоставимы с ежегодными «неэпидемическими» показателями заболеваний респираторной системы. По состоянию на 31 декабря 2020 года коронавирусом заболели 3,16 млн россиян, умерли 57 019 человек. Это в 2,4 раза больше всех скончавшихся за прошлый год в РФ от пневмонии (23 352 чел.) и чуть меньше летальных исходов, чем от всех респираторных заболеваний (58 000 чел.). Таким образом, несмотря на то что смертность от болезней органов дыхания в РФ занимает лишь 5-е место в структуре заболеваемости, социально-экономические потери вполне сопоставимы с таковыми от новой коронавирусной инфекции COVID-19, распространение которой признано ВОЗ в 2020 году пандемией.

Вторичная эмфизема легких является одним из важнейших заболеваний, относящихся к ХОБЛ. В Российской Федерации, по данным официальной статистики, ХОБЛ страдает около 2,4 млн человек, однако по данным эпидемиологических исследований их количество значительно больше и может достигать 16 млн человек, что является актуальной проблемой, приводящей к весьма существенному социальному и экономическому ущербу [4, 12]. Согласно Глобальной стратегии GOLD ХОБЛ — заболевание, характеризующееся персистирующим ограничением воздушного потока, которое обычно прогрессирует и является следствием хронического воспалительного ответа дыхательных путей и легочной ткани на воздействие ингалируемых повреждающих частиц или газов. Обострения и сопутствующие заболевания являются неотъемлемой частью болезни и вносят значительный вклад в клиническую картину и прогноз [1]. Диагноз ХОБЛ ставится на основании данных спирометрии и включает в себя несколько стадий, основанных на показателях ограничения скорости воздушного потока. У пациентов с ОФВ$_1$/ФЖЕЛ < 70 % через 15 мин после 400 мкг сальбутамола:

- стадия 1: ОФВ$_1$ ≥ 80 % от должного;
- стадия 2: ОФВ$_1$ — 50–79 % от должного;
- стадия 3: ОФВ$_1$ — 30–49 % от должного;
- стадия 4: ОФВ$_1$ < 30 % от должного [1, 12].

Американским торакальным обществом разработаны критерии функционального диагноза эмфиземы легких: снижение DLCO < 80 % от должного при одновременном снижении ОФВ$_1$ < 80 % от должного и/или повышении остаточного объема легких (ООЛ) > 120 % [21].

Отражением этого является повышение легочных объемов. Патогенез развития эмфиземы легких кратко представлен на рис. 1.

Согласно Lynch D. A. et al. (рекомендации Fleishner society от 2018 г.), эмфизема легких характеризуется наличием перманентно расширенных воздушных пространств дистальнее терминальных бронхиол с разрушением альвеолярной стенки. Морфологически выделяют следующие типы эмфиземы:

1) центриацинарная (центрилобулярная) — определяется в тех случаях, когда деструкция ограничена респираторными бронхиолами и центральными частями ацинуса, которые окружены макроскопически нормальной легочной паренхимой;

Рис. 1. Патогенез развития эмфиземы легких [15]

2) панацинарная (панлобулярная) — определяется как деструкция альвеолярных стенок практически на всем протяжении легкого может сочетаться с центриацинарной;
3) парасептальная (дистальная ацинарная) — характеризуется распространением участков эмфизематозной перестройки вдоль листков костальной и междолевой плевры с распространением на всю вторичную легочную дольку [3].

Также в зависимости от объема пораженной эмфизематозными изменениями легочной ткани Lynch D. A. et al. (рекомендации Fleishner society, 2018 г.) выделяют несколько степеней тяжести заболевания:

— 1-я степень (A) — минимальная (<0,5% легочной зоны);
— 2-я степень (B) — умеренная (0,5–5 % легочной зоны);
— 3-я степень (C) — средняя (> 5 % любой легочной зоны);
— 4-я степень (D) — сливающаяся;
— 5 степень (E) — выраженная деструктивная эмфизема [17].

Сегодня компьютерная томография является наиболее чувствительным неинвазивным методом диагностики морфологических изменений в легочной паренхиме [3].

Развитие ИИ

Существует три основных направления развития ИИ в рентгенологии: визуализация, сегментация и радиомика [2]. Программные продукты разнообразны, и их применение значительно упрощает анализ изображений и сокращает время их обработки. Спектр патологий, анализируемых с помощью ИИ, обширен, однако в своей работе мы сделали акцент на эмфизему легких. Современ-

ные приложения для ее оценки доступны как в расширенных версиях рабочих станций компьютерных томографов, так и в виде отдельных программ. Изначально методы обработки медицинских изображений ИИ в большей степени основывались на встроенных алгоритмах с параметрами, заложенными экспертами. Однако последние успехи в изучении ИИ привели к появлению новых недетерминированных алгоритмов глубокого обучения, которые не требуют четкого определения характеристик, и представляющих принципиально иную парадигму машинного обучения. Так называемые сверточные нейронные сети (convolutional neural networks — CNN) на настоящий момент превалируют над другими методами машинного обучения, используемыми в сфере обработки медицинских изображений. Типичная CNN содержит серию слоев, которые последовательно трансформируют входящие данные изображения в желаемые конечные точки, одновременно изучая все более высокоуровневые функции формирования изображений. Начиная с входного изображения, «скрытые слои» в CNN обычно включают в себя последовательность операций свертки и объединения, извлекающих карты объектов и выполняющих агрегацию объектов соответственно. Затем за этими скрытыми слоями следует интеграция (связывание) слоев, обеспечивающая «рассуждения» высокого уровня, прежде чем выходной слой выдаст прогноз. CNN часто проходят сквозную подготовку с разметкой данных для контролируемого обучения (рис. 2) [14, 22].

Метод базируется на анализе признака, параметры которого извлекаются из области интереса на основании знаний эксперта. Примеры этих признаков

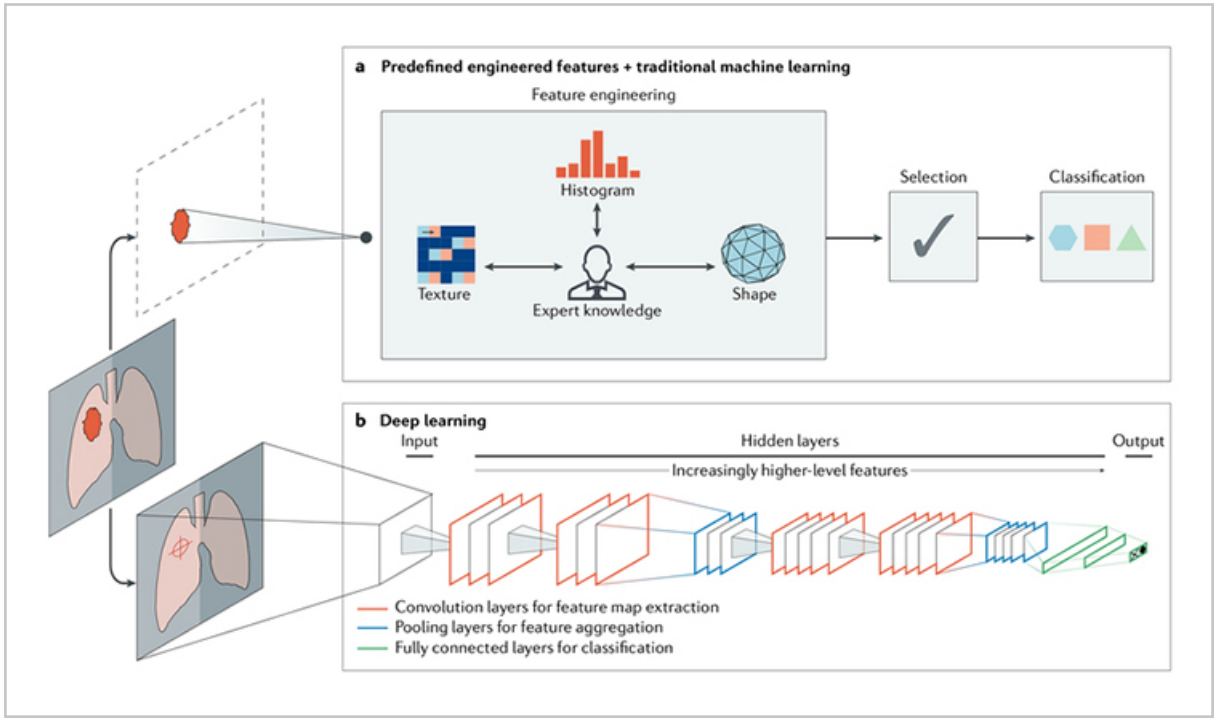

Рис. 2. Методы обработки медицинских изображений ИИ на примере диагностики опухолевого поражения легких [14]

в характеристике рака легкого включают в себя объем, форму, текстуру, интенсивность и локализацию опухоли. Самые надежные параметры выбираются и включаются в классификаторы машинного обучения.

Метод использует глубокое обучение и не требует четкой разметки области интереса, обычно достаточно локализации. Программа охватывает нескольких слоев, в которых обнаружен искомый признак, отбор и окончательная классификация выполняются одновременно во время обучения. По мере того как слои изучают все более и более высокоуровневые объекты, более ранние слои могут изучать абстрактные формы, такие как линии и тени, в то время как другие, более глубокие слои, могут изучать целые органы или объекты. Оба метода относятся к области радиомики — технологии, основанной на извлечении большого количества признаков из изображений с использованием алгоритмов характеристики данных.

Другие виды нейронных сетей, такие как глубинные автокодировщики (deep autoencoders — DAE) и генеративные состязательные сети (generative adversarial networks — GAN), больше подходят для неконтролируемых задач обучения на немаркированных данных. Трансферное обучение или использование предварительно обученных сетей на других наборах данных часто применяется при работе с дефицитными базами данных [6].

Алгоритм обработки компьютерных томограмм различными инструментами включает сегментацию легочной ткани, то есть разграничение ее от мягких тканей, средостения и сосудов, затем извлечение и квалификацию радиомических признаков (картирование) с последующим их анализом [14]. Известно, что на количественную оценку эмфиземы КТ влияют как доза облучения (т. е. шум изображения), так и методика реконструкции. Учитывая увеличение количества КТ-исследований, выполняемых одному пациенту, особое значение приобретает снижение дозовой нагрузки. В свою очередь, снижение дозы приводит к более высоким уровням шума, особенно когда изображения реконструируются с использованием обычной обратной проекции с фильтрацией (filtered back projection — FBP). Поэтому было разработано несколько методов итеративной реконструкции (iterative reconstruction — IR) для уменьшения шума изображения. При пониженной дозе использование методики FBP приводит к переоценке количества эмфиземы из-за более высоких уровней шума, в то время как использование IR может привести к недооценке из-за уменьшенного шума [9, 24, 25]. В работах, посвященных количественной оценке эмфиземы легких, используются различные пороговые значения плотности легочной ткани: от −910 HU до −1000 HU [8, 13, 24]. Однако на данный момент общепринятым значением является плотность ниже −950 HU [17].

Первые научные работы, посвященные количественной оценке эмфиземы легких, согласно сервису Pubmed, датируются 1964 г. [7], тогда французские ученые попытались проанализировать и классифицировать эмфизему на основании данных спирометрии. Позднее, в 1969 г., Dunnil предложил способ оценки пораженной ткани, основанный на тестах, проводимых на биопсийном материале [10]. Данные о корреляции морфологических изменений с визуализируемыми при компьютерной томогра-

фии впервые были получены в 1984 г. Hayhurst et al. (1984) сравнили данные КТ легких с биопсийным материалом 6 пациентов, страдающих центрилобулярной эмфиземой, и 5 здоровых пациентов. Они оценили распределение частот значений понижения плотности легочной ткани на КТ и показали, что у пациентов с эмфиземой было большее количество пикселей со значениями ослабления от −900 HU до −1000 HU, чем у пациентов без эмфиземы ($p < 0,001$, тест Уилкоксона) [8, 13, 24].

Параллельно предпринимались попытки оценки корреляционных связей между данными анализа КТ-изображений с результатами тестов ФВД. В одной из первых работ, посвященной этой проблеме, Nakano Y. et al. (2000) опубликовали данные о корреляции объема эмфиземы с легочными функциональными тестами (ОФВ1, ФЖЕЛ, ООЛ, ПСВ, ОЕЛ, DLCO, Va). Объем эмфизематозных изменений, выраженный в процентном отношении к неизмененной легочной ткани, визуализированных по КТ-изображениям (LAA %), достоверно коррелировал с ОФВ1, ОФВ1/ФЖЕЛ, ПСВ, ООЛ/ОЕЛ и DLCO/Va. Было показано, что LAA более тесно коррелирует с ОФВ1 и ОФВ1/ФЖЕЛ [18].

Исследование, проведенное Arakawa A. et al. (2001), включало количественную оценку КТ-изображений на вдохе и выдохе с различными пороговыми значениями пониженной плотности легочной ткани (−950, −910, −900 и −890 HU при вдохе и −930, −900, −810, −790 и −770 HU на выдохе). LAA % на пороге −950 на вдохе показал хорошую корреляцию с ОФВ1 ($r2 = 0,705$; $p \leq 0,0001$). LAA % на пороге −950, −910 HU на вдохе показал хорошую корреляцию с ОФВ1/ФЖЕЛ ($r2 = 0,700–0,752$; $p \leq 0,0001$). LAA % на пороге −930, −900, −810, −790, −770 HU на выдохе показал хорошую корреляцию с ОФВ1, ОФВ1/ФЖЕЛ и DLCO/Va ($r2 = 0,655–0,854$; $p \leq 0,0001$). Существенная корреляция наблюдалась между LAA % на пороге −900 HU и ОФВ1/ФЖЕЛ ($r2 = 0,854$; $p \leq 0,0001$; r2 – коэффициент корреляции). Также исследователи сделали вывод, что КТ-денситометрия на выдохе показала лучшую корреляцию с тестами функции легких, чем на вдохе [5].

Park Y. et al. (2008) создали систему, которая при анализе КТ-изображения разделяет легочную ткань на 4 типа зон, картируемых различными цветами: нормальная паренхима, участки бронхообструкции, участки слабо выраженной эмфиземы и участки ярко выраженной (тяжелой) эмфиземы (normal lung —NL, bronchiolitis obliterans — BO, mild emphysema — ME и severe emphysema — SE соответственно). На основании этого они ввели понятие структурного индекса эмфиземы, рассчитываемого по формуле $0,3 \times ME \times SE$ (%), значение которого показало лучшую корреляцию с легочными функциональными тестами, чем индекс эмфиземы только на основе плотности легочной: $r = 0,71$ для ОФВ1/ФЖЕЛ; $r = 0,54$ для диффузионной способности (DLCO) соответственно [20].

M. Paoletti et al. (2015) также при сравнении данных количественной КТ на вдохе и выдохе с ОФВ1, ФЖЕЛ, ООЛ, ОЕЛ, ЖЕЛ получили сильную корреляцию LAA %-950insp и LAA %-910exp, при превышении средних значений, с прогнозируемым DLCO, в отличие от ОФВ1/ЖЕЛ. И наоборот, значения LAA %-950insp и LAA %-910exp ниже среднего коррелировали с ОФВ1/ЖЕЛ, но не с DLCO. Таким образом, авторы

показали, что связь между функцией легких и степенью деструкции паренхимы по КТ-изображениям при ХОБЛ носит нелинейный характер, что значимую корреляцию с легкой деструкцией паренхимы имеет ОФВ1/ЖЕЛ, с более выраженной паренхиматозной деструкцией — DLCO %. [19]

При количественной оценке КТ-изображений 172 пациентов Song L. et al. (2020) определяли общий объем легких и индекс эмфиземы на вдохе и выдохе, где индекс эмфиземы рассчитывался как процент вокселей со значениями плотности ниже порога -950 HU из общего числа вокселей во всем легком. Общий объем легких на вдохе показал умеренную или очень сильную корреляцию с ОЕЛ, ООЛ, ФЖЕЛ и ОФВ1/ФЖЕЛ ($r = 0{,}81$, 0,60, 0,56 и −0,49; каждый $p < 0{,}001$). Общий объем легких на выдохе показал умеренную или сильную корреляцию с ОЕЛ, ООЛ и ОФВ1/ФЖЕЛ ($r = 0{,}75$, 0,66 и −0,43; каждый $p < 0{,}001$). Индекс эмфиземы на выдохе показал умеренную отрицательную корреляцию с КСО % ($r = -0{,}42$; $p < 0{,}001$) [23].

A. M. Fischer et al. (2020) при проведении анализа с использованием двух различных типов реконструкции изображений (мягкий и жесткий кернели: B31s и B60s) показали наличие очень сильной корреляции результатов с Индексом Тиффно, представив практически идентичные коэффициенты корреляции = −0,86 ($p < 0{,}0001$) и = −0,85 ($p < 0{,}0001$), что говорит о возможности использования любого из этих типов реконструкции для анализа изображений и получения достоверного результата [11].

Заключение

Количественная оценка эмфиземы является темой исследований на протяжении многих лет вследствие трудоемкости анализа и субъективности визуальной составляющей. Наличие ХОБЛ существенно влияет на качество жизни пациента, его работоспособность и финансовую стабильность в связи с наличием высоких расходов на лечение. ХОБЛ не поддается излечению, однако ранняя диагностика и лечение очень важны и могут помочь замедлить прогрессирование симптомов и снизить риск обострений.

Быстрый рост и развитие ИИ позволяют создавать более качественные программные продукты для автоматического анализа изменений в легочной паренхиме.

Возможно, из-за проблем с предоставлением достоверных количественных данных GOLD до сих пор не санкционировал КТ грудной клетки как эффективный метод диагностики пациентов, подозреваемых в наличии ХОБЛ. Однако в сочетании со спирометрией КТ дает дополнительное представление о патологических изменениях, которые непосредственно способствуют обструкции дыхательных путей, таких как деструкция паренхимы легких, утолщение бронхиальной стенки и увеличение задержки воздуха путем формирования воздушных ловушек, а также позволяет обмениваться информацией в рамках телемедицинских консультаций, особенно в условиях ограниченного использования спирометров экспертного класса. Необходимо продолжить изучение возможностей применения ИИ в области лучевой диагностики и радиомики эмфиземы в частности, которые позволят разработать современные алгоритмы комплексной, объективной и персонализированной оценки течения и прогноза заболевания.

Список литературы

1. *Айсанов З. Р. и др.* Национальные клинические рекомендации по диагностике и лечению хронической обструктивной болезни легких: алгоритм принятия клинических решений // Пульмонология. 2017. Т. 27. № 1. С. 13–20. doi: 10.18093/0869-0189-2017-27-1-13-20.
2. *Мелдо А. А., Уткин Л. В., Трофимова Т. Н.* Искусственный интеллект в медицине: современное состояние и основные направления развития интеллектуальной диагностики // Лучевая диагностика и терапия. 2020. № 1. С. 9–17. doi:10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17.
3. *Трофимова Т. Н. и др.* Современные классификации RADS и принципы построения заключения. 2018. С. 31–69.
4. *Тюрин И. Е.* Компьютерная томография органов дыхания // Практическая пульмонология. 2003. № 3. С. 11–15.
5. *Arakawa A., Yamashita Y., Nakayama Y., Kadota M., Korogi H., Kawano O., Matsumoto M., Takahashi M.* Assessment of lung volumes in pulmonary emphysema using multidetector helical CT: comparison with pulmonary function tests. Computerized Medical Imaging and Graphics. 2001. V. 25. No. 5. P. 399–404.
6. *Chung A. C. S. et al.* Information processing in medical imaging. Information Processing in Medical Imaging. 2019.
7. *Coursergue J. L.* Spirographic study of alveolar emphysema and so-called «emphysematous» states. Practical diagnosis and attempted quantification. Maroc medical. 1964. V. 43. P. 713.
8. *Daghfous J. et al.* Pulmonary emphysema: quantification using computed tomography and correlations with respiratory function tests //Revue des maladies respiratoires. 1993. V. 10. No. 4. P. 299–305.
9. *den Harder A. M. et al.* Emphysema quantification using chest CT: influence of radiation dose reduction and reconstruction technique. European radiology experimental. 2018. V. 2. No. 1. P. 30.
10. *Dunnill M. S.* Emphysema: The Classification and Quantification of Emphysema. 1969. V. 62. P. 1024–1027.
11. *Fischer A. M., Varga-Szemes A., van Assen M., L. Parkwood Griffith, Sahbaee P., Sperl J. I., Nance J. W., Schoepf U. J.* Comparison of Artificial Intelligence–Based Fully Automatic Chest CT Emphysema Quantification to Pulmonary Function Testing. Am. J. of Roentgenology. 2020. V. 5. P. 1065–1071.
12. *Frindler Z. G. et al.* Global Strategy for the Diagnosis, Management, and Prevention of Chronic Obstructive Lung Disease 2020 Report.
13. *Hayhurst M. D. et al.* Diagnosis of pulmonary emphysema by computerised tomography. The Lancet. 1984. V. 324. No. 8398. P. 320–322.
14. *Hosny A. et al.* Artificial intelligence in radiology. Nature Reviews Cancer. 2018. T. 18. No. 8. P. 500–510.
15. https://www.memorangapp.com/flashcards/191770/Obstructive+Lung+Disease/
16. https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)
17. *Lynch D. A. et al.* CT-based visual classification of emphysema: association with mortality in the COPDGene study. Radiology. 2018. V. 288. No. 3. P. 859–866.
18. *Nakano Y., Muro S., Sakai H., Hirai T., Chin K., Tsukino M., Nishimura K., Itoh H., Par P. D., Hogg J. C., Mishima M.* Computed tomographic measurements of airway dimensions and emphysema in smokers. Correlation with lung function. Am. J. Respir Crit Care Med. 2000.

V. 162 (3 Pt 1). P. 1102–8. doi: 10.1164/ajrccm.162.3.9907120. PMID: 10988137.
19. *Paoletti M. et al.* Chronic Obstructive Pulmonary Disease: Pulmonary Function and CT Lung Attenuation Do Not Show Linear Correlation. Radiology. 2015. V. 276:2. P. 571–578.
20. *Park Y. S, Seo J. B., Kim N., Chae E. J., Oh Y. M., Lee S. D., Lee Y., Kang S. H.* Texture-based quantification of pulmonary emphysema on high-resolution computed tomography: comparison with density-based quantification and correlation with pulmonary function test. Invest Radiol. 2008. V. 43 (6). P. 395–402. doi: 10.1097/RLI.0b013e31816901c7. PMID: 18496044.
21. *Pellegrino R. et al.* Interpretative strategies for lung function tests. European respiratory journal. 2005. V. 26. No. 5. P. 948–968.
22. *Shin H. C. et al.* Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. IEEE transactions on medical imaging. 2016. V. 35. No. 5. P. 1285–1298.
23. *Song L., Leppig J. A., Hubner R. H., Lassen-Schmidt B. C., Neumann K., Theilig D. C., Feldhaus F. W., Fahlenkamp U. L., Hamm B., Song W., Jin Z., Doellinger F.* Quantitative CT Analysis in Patients with Pulmonary Emphysema: Do Calculated Differences Between Full Inspiration and Expiration Correlate with Lung Function? International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disease. 2020. V. 3. No. 15. P. 1877–1886. doi: 10.2147/COPD.S253602. PMID: 32801683; PMCID: PMC7413697.
24. *Thurlbeck W. M., Müller N. L.* Emphysema: definition, imaging, and quantification. AJR. American Journal of Roentgenology. 1994. V. 163. No. 5. P. 1017–1025.
25. *Willemink M. J. et al.* Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 1: technical principles. European radiology. 2013. V. 23. No. 6. P. 1623–1631.
26. *Willemink M. J. et al.* Iterative reconstruction techniques for computed tomography part 2: initial results in dose reduction and image quality. European radiology. 2013. V. 23. No. 6. P. 1632–1642.

References

1. *Aysanov Z. R. et al.* National clinical recommendations on diagnosis and treatment of COPD: algorithm of making a decision. Pulmonologiya. 2017. T. 27. No. 1. P. 13–20 (in Russian). doi: 10.18093/0869-0189-2017-27-1-13-20.
2. *Meldo A. A., Utkin L. V., Trofimova T. N.* Artificial intelligence in medicine: modern condition and the main directions of development. Radiation diagnostics and therapy. 2020. No. 1. P. 9–17. doi:10.22328/2079-5343-2020-11-1-9-17.
3. *Trofimova T. N. et al.* Modern RADS and the principles of making a description .Saint-Petersburg. 2018. P. 31–69.
4. *Tyurin I. E.* Chest Computed Tomography. Practical Pulmonology. 2003. No. 3. P. 11–15.
5. *Arakawa A., Yamashita Y., Nakayama Y., Kadota M., Korogi H., Kawano O., Matsumoto M., Takahashi M.* Assessment of lung volumes in pulmonary emphysema using multidetector helical CT: comparison with pulmonary function tests. Computerized Medical Imaging and Graphics. 2001. V. 25. No. 5. P. 399–404.
6. *Chung A. C. S. et al.* Information processing in medical imaging. Information Processing in Medical Imaging. 2019.
7. *Coursergue J. L.* Spirographic study of alveolar emphysema and so-called «emphysematous» states. Practical diagnosis

and attempted quantification. Maroc medical. 1964. V. 43. P. 713.
8. *Daghfous J. et al.* Pulmonary emphysema: quantification using computed tomography and correlations with respiratory function tests // Revue des maladies respiratoires. 1993. V. 10. No. 4. P. 299–305.
9. *den Harder A. M. et al.* Emphysema quantification using chest CT: influence of radiation dose reduction and reconstruction technique. European radiology experimental. 2018. V. 2. No. 1. P. 30.
10. *Dunnill M. S.* Emphysema: The Classification and Quantification of Emphysema. 1969. V. 62. P. 1024–1027.
11. *Fischer A. M., Varga-Szemes A., van Assen M., L. Parkwood Griffith, Sahbaee P., Sperl J. I., Nance J. W., Schoepf U. J.* Comparison of Artificial Intelligence–Based Fully Automatic Chest CT Emphysema Quantification to Pulmonary Function Testing. American Journal of Roentgenology. 2020. V. 5. P. 1065–1071.
12. *Frindler Z. G. et al.* Global Strategy for the Diagnosis, Management, and Prevention of Chronic Obstructive Lung Disease. 2020. Report.
13. *Hayhurst M. D. et al.* Diagnosis of pulmonary emphysema by computerised tomography. The Lancet. 1984. V. 324. No. 8398. P. 320–322.
14. *Hosny A. et al.* Artificial intelligence in radiology. Nature Reviews Cancer. 2018. V. 18. No. 8. P. 500–510.
15. https://www.memorangapp.com/flashcards/191770/Obstructive+Lung+Disease/
16. https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)
17. *Lynch D. A. et al.* CT-based visual classification of emphysema: association with mortality in the COPDGene study. Radiology. 2018. V. 288. No. 3. P. 859–866.
18. *Nakano Y., Muro S., Sakai H., Hirai T., Chin K., Tsukino M., Nishimura K., Itoh H., Par P. D., Hogg J. C., Mishima M.* Computed tomographic measurements of airway dimensions and emphysema in smokers. Correlation with lung function. Am. J. Respir Crit Care Med. 2000. V. 162 (3 Pt 1). P. 1102–8. doi: 10.1164/ajrccm.162.3.9907120. PMID: 10988137.
19. *Paoletti M. et al.* Chronic Obstructive Pulmonary Disease: Pulmonary Function and CT Lung Attenuation Do Not Show Linear Correlation. Radiology. 2015. V. 276:2. P. 571–578.
20. *Park Y. S., Seo J. B., Kim N., Chae E. J., Oh Y. M., Lee S. D., Lee Y., Kang S. H.* Texture-based quantification of pulmonary emphysema on high-resolution computed tomography: comparison with density-based quantification and correlation with pulmonary function test. Invest Radiol. 2008. V. 43 (6). P. 395–402. doi: 10.1097/RLI.0b013e31816901c7. PMID: 18496044.
21. *Pellegrino R. et al.* Interpretative strategies for lung function tests. European respiratory Journal. 2005. V. 26. No. 5. P. 948–968.
22. *Shin H. C. et al.* Deep convolutional neural networks for computer-aided detection: CNN architectures, dataset characteristics and transfer learning. IEEE transactions on medical imaging. 2016. V. 35. No. 5. P. 1285–1298.
23. *Song L., Leppig J. A., Hubner R. H., Lassen-Schmidt B. C., Neumann K., Theilig D .C., Feldhaus F. W., Fahlenkamp U. L., Hamm B., Song W., Jin Z., Doellinger F.* Quantitative CT Analysis in Patients with Pulmonary Emphysema: Do Calculated Differences Between Full Inspiration and Expiration Correlate with Lung Function? International Journal of Chronic Obstructive Pulmonary Disea-

se. 2020. V. 3. No. 15. P. 1877–1886. doi: 10.2147/COPD.S253602. PMID: 32801683; PMCID: PMC7413697.
24. *Thurlbeck W. M., Müller N. L.* Emphysema: definition, imaging, and quantification. AJR. American Journal of Roentgenology. 1994. V. 163. No. 5. P. 1017–1025.
25. *Willemink M. J. et al.* Iterative reconstruction techniques for computed tomography Part 1: technical principles. European radiology. 2013. V. 23. No. 6. P. 1623–1631.
26. *Willemink M. J. et al.* Iterative reconstruction techniques for computed tomography part 2: initial results in dose reduction and image quality. European radiology. 2013. V. 23. No. 6. P. 1632–1642.

Сведения об авторах

Грива Надежда Алексеевна, аспирант ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России, ГБУЗ «Ленинградская областная клиническая больница».
Адрес: 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4.
Телефон: +7 (931) 275-82-14. Электронная почта: grivamd@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-3580-8723.

Griva Nadezhda Alekseevna, Postgraduate, Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of Russia, Leningrad Regional Clinical Hospital.
Address: 2-4, Ligovskiy pr., St. Petersburg, 191036, Russia.
Phone number: +7 (931) 275-82-14. E-mail: grivamd@gmail.com
ORCID.org/0000-0003-3580-8723.

Гаврилов Павел Владимирович, кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник, руководитель направления «Лучевая диагностика» ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России.
Адрес: 191036, г. Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4.
Телефон: +7 (812) 775-75-55. Электронная почта: spbniifrentgen@mail.ru
ORCID.org/0000-0003-3251-4084.

Gavrilov Pavel Vladimirovich, Ph. D. Med., Leading Researcher, Head of the Department of Radiology Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of Russia.
Address: 2-4, Ligovsky pr., St. Petersburg, 191036, Russia.
Phone number: +7 (812) 775-75-55. E-mail: spbniifrentgen@mail.ru
ORCID.org/0000-0003-3251-4084.

Соколович Евгений Георгиевич, доктор медицинских наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФГБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт фтизиопульмонологии» Минздрава России.
Адрес: 191036, Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 2-4.
Телефон: +7 (812) 775-75-50 (доб. 5556). Электронная почта: sokole@mail.ru
ORCID.org/0000-0003-4794-0588.

Sokolovich Evgeny Georgievich, M. D. Med., Professor, Thoracic Surgeon, Deputy Director for Science, Saint-Petersburg State Research Institute of Phthisiopulmonology, Ministry of Healthcare of Russia.
Address: 2-4, Ligovsky pr., St. Petersburg, 191036, Russia.
Phone number: +7 (812) 775-75-50 (доб. 5556).
E-mail: sokole@mail.ru
ORCID.org/0000-0003-4794-0588

Дата поступления статьи в редакцию издания: 31.08.2021 г.
Дата одобрения после рецензирования: 17.09.2021 г.
Дата принятия статьи к публикации: 08.10.2021 г.