



Сравнение возможностей и ограничений анализа остаточных изменений в легких после COVID-19-ассоциированного поражения при визуальной оценке, шиарлет-преобразовании и радиомическом методе

Кенц А.С.¹, Тюрин И.Е.²

¹ ФГБУ «Федеральный Сибирский научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства», ул. Коломенская, 26, Красноярск, 660037, Российская Федерация

² ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России, ул. Баррикадная, 2/1, стр. 1, Москва, 125993, Российская Федерация

Кенц Анжелика Станиславовна, врач-рентгенолог ФГБУ «Федеральный Сибирский научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства»; <https://orcid.org/0000-0003-4804-8268>

Тюрин Игорь Евгеньевич, д. м. н., профессор, заведующий кафедрой рентгенологии и радиологии ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России; <https://orcid.org/0000-0003-3931-1431>

Резюме

Цель: сравнить воспроизводимость, ограничения и возможности трех иерархических уровней анализа компьютерных томографических (КТ) изображений при оценке остаточных изменений в легочной паренхиме после перенесенной коронавирусной инфекции – визуальной оценки, шиарлет-преобразования и количественных радиомических признаков.

Материал и методы. Проведен ретроспективный анализ данных 48 пациентов с подтвержденным поражением легких при вирусной инфекции, ассоциированной с COVID-19. Пациенты распределены на три группы: полный регресс изменений (20 человек; 41,7%), остаточные изменения в легких (18 человек; 37,5%) и летальный исход в острой фазе (10 человек; 20,8%). Анализ включал: визуальную оценку объема поражения по шкале КТ1–4, использование шиарлет-преобразования с цветовым кодированием плотности для улучшения восприятия структурных паттернов, радиомический анализ с ручной сегментацией регионов интереса и извлечением признаков энтропии (JointEntropy) и гомогенности (image data matrix, IDM) через 3D Slicer (расширение PyRadiomics). Воспроизводимость оценивали по коэффициенту каппа Козна (κ) для визуальной и шиарлет-оценок и по внутриклассовому коэффициенту корреляции (intraclass correlation coefficient, ICC) для радиомических признаков с расчетом доверительных интервалов (ДИ). Статистический анализ включал критерий Манна–Уитни, корреляцию Спирмена (ρ) и ROC-анализ.

Результаты. Коэффициент воспроизводимости составил: $\kappa=0,68$ (95% ДИ 0,59–0,76) для визуальной оценки, $\kappa=0,83$ (95% ДИ 0,76–0,89) для шиарлет-преобразования, ICC=0,94 (95% ДИ 0,91–0,97) для энтропии и ICC=0,92 (95% ДИ 0,88–0,95) для гомогенности. В зонах остаточных изменений выявлены достоверное повышение энтропии ($6,91 \pm 0,42$ против $5,85 \pm 0,31$ в сохраненных участках; $p < 0,001$) и снижение гомогенности ($0,21 \pm 0,04$ против $0,29 \pm 0,03$; $p < 0,001$). У пациентов с летальным исходом отмечена бимодальность распределения плотности (размах >400 HU) и нарастание энтропии $>0,2$ ед/сут. Снижение энтропии $>0,4$ ед/год ассоциировано с благоприятным ремоделированием легочной ткани (чувствительность 89%, специфичность 91%). Энтропия демонстрировала умеренную положительную корреляцию с визуальным объемом поражения ($\rho=0,64$; $p < 0,01$), тогда как гомогенность коррелировала с плотностью ткани ($\rho=0,81$; $p < 0,001$).

Заключение. Предложенная иерархия методов отражает эволюцию подхода к интерпретации постковидных изменений: визуальная оценка обеспечивает базовую семиотику, но ограничена субъективностью ($\kappa < 0,70$), шиарлет-преобразование повышает воспроизводимость за счет улучшения восприятия структурных паттернов ($\kappa > 0,80$), радиомические признаки (энтропия, гомогенность) предоставляют воспроизводимые количественные маркеры ремоделирования легочной ткани (ICC $> 0,90$). Высокая воспроизводимость энтропии подтверждает ее потенциал как объективного прогностического критерия: стабилизация на уровне 6,5–7,0 ед. предсказывает формирование остаточных изменений, снижение $< 6,8$ ед. – полный регресс, нарастание $> 7,8$ ед. с бимодальностью плотности – высокий риск летального исхода. Интеграция количественных радиомических признаков в клиническую практику расширяет возможности поддержки принятия решений при анализе остаточных изменений после COVID-19.

Ключевые слова: компьютерная томография легких; остаточные изменения после COVID-19; текстурный анализ; энтропия; гомогенность; шварлет-преобразование; воспроизводимость; радиомика; прогностическая модель.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кенц А.С., Тюрин И.Е. Сравнение возможностей и ограничений анализа остаточных изменений в легких после COVID-19-ассоциированного поражения при визуальной оценке, шварлет-преобразовании и радиомическом методе. *Вестник рентгенологии и радиологии*. 2026; 107(2): 88–97. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2026-107-2-88-97>

Для корреспонденции: Кенц Анжелика Станиславовна, e-mail: anzhelika.kents@gmail.com

Статья поступила 22.04.2026

После доработки 04.06.2026

Принята к печати 05.06.2026

Comparison of Capabilities and Limitations of Analyzing Residual Pulmonary Changes After COVID-19-Related Injury Using Visual Assessment, Shearlet Transform, and Radiomic Methods

Anzhelika S. Kents¹, Igor E. Turin²

¹ Federal Siberian Research Clinical Centre, FMBA of Russia, ul. Kolomenskaya, 26, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

² Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, ul. Barrikadnaya, 2/1, str. 1, Moscow, 125993, Russian Federation

Anzhelika S. Kents, Radiologist, Federal Siberian Research Clinical Centre, FMBA of Russia; <https://orcid.org/0000-0003-4804-8268>

Igor E. Turin, Dr. Med. Sc., Professor, Chief of Chair of Roentgenology and Radiology, Russian Medical Academy of Continuous Professional Education; <https://orcid.org/0000-0003-3931-1431>

Abstract

Objective: To compare the reproducibility, limitations and capabilities of three hierarchical levels of computed tomography (CT) image analysis in assessing residual changes in lung parenchyma after coronavirus infection: from visual assessment to shearlet transform and quantitative radiomic features.

Material and methods. A retrospective analysis of data from 48 patients with confirmed lung damage associated with COVID-19 was conducted. Patients were divided into three groups: complete regression of changes (20 patients; 41.7%), residual lung changes (18 patients; 37.5%), and death in acute phase (10 patients; 20.8%). The analysis included: visual assessment of the lesion volume according to the CT1–4 scale; use of the shearlet transform with color-coded density to improve the perception of structural patterns; radiomics analysis with manual segmentation of regions of interest and extraction of entropy (JointEntropy) and homogeneity (image data matrix, IDM) features using 3D Slicer (PyRadiomics extension). Reproducibility was assessed using Cohen's kappa coefficient (κ) for visual and Shearlet assessments and the intraclass correlation coefficient (ICC) for radiomic features with calculation of confidence intervals (CI). Statistical analysis included the Mann–Whitney test, Spearman's correlation (ρ), and ROC analysis.

Results. The reproducibility coefficients were: $\kappa=0.68$ (95% CI 0.59–0.76) for visual assessment, $\kappa=0.83$ (95% CI 0.76–0.89) for the shearlet transform, ICC=0.94 (95% CI 0.91–0.97) for entropy, and ICC=0.92 (95% CI 0.88–0.95) for homogeneity. In the areas of residual changes, a significant increase in entropy (6.91 ± 0.42 versus 5.85 ± 0.31 in the intact areas; $p < 0.001$) and a decrease in homogeneity (0.21 ± 0.04 versus 0.29 ± 0.03 ; $p < 0.001$) were revealed. In patients with fatal outcome, a bimodal density distribution (range >400 HU) and an entropy increase of >0.2 units/day were noted. A decrease in entropy of >0.4 units/year was associated with favorable remodeling (sensitivity 89%, specificity 91%). Entropy demonstrated a moderate positive correlation with the visual volume of the lesion ($\rho=0.64$; $p < 0.01$), while homogeneity correlated with tissue density ($\rho=0.81$; $p < 0.001$).

Conclusion. The proposed hierarchy of methods reflects the evolution of the approach to interpreting post-COVID-19 changes: visual assessment provides basic semiotics but is limited by subjectivity ($\kappa < 0.70$); the shearlet transform increases reproducibility by improving the perception of structural patterns ($\kappa > 0.80$); radiomic features (entropy, homogeneity) provide reproducible quantitative markers of remodeling (ICC > 0.90).

The high reproducibility of entropy confirms its potential as an objective prognostic criterion: stabilization at a level of 6.5–7.0 units predicts the formation of residual changes, a decrease to <6.8 units means complete regression, and an increase to >7.8 units with bimodal density means a high risk of mortality. The integration of quantitative radiomic features into clinical practice expands the possibilities for decision support in the analysis of residual changes after COVID-19.

Keywords: lung computed tomography; residual changes after COVID-19; texture analysis; entropy; homogeneity; shearlet transform; reproducibility; radiomics; prognostic model.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

For citation: Kents AS, Turin IE. Comparison of capabilities and limitations of analyzing residual pulmonary changes after COVID-19-related injury using visual assessment, shearlet transform, and radiomic methods. *Journal of Radiology and Nuclear Medicine*. 2026; 107(2): 88–97 (in Russian). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2026-107-2-88-97>

For corresponding: Anzhelika S. Kents, e-mail: anzhelika.kents@gmail.com

Received April 22, 2026

Revised June 4, 2026

Accepted June 5, 2026

Введение / Introduction

Остаточные изменения легочной паренхимы после COVID-19 сохраняются у 30–56% переболевших, формируя клинически значимый риск прогрессирования и хронической дыхательной недостаточности [1, 2]. В повседневной практике рентгенолог опирается на визуальную оценку данных компьютерных томограмм (КТ). Несмотря на доступность, этот подход остается качественным и субъективным: межэкспертная согласованность умеренная, что затрудняет объективный контроль динамики и раннее выявление структурного ремоделирования легочной ткани [3].

В предшествующих работах нами была предложена методика интерпретации КТ-изображений в острый и ранний отсроченный периоды (3–6 мес) COVID-19-ассоциированного поражения легких с использованием шиарлет-преобразования и цветового кодирования плотности, улучшающая визуализацию патологических паттернов [4]. Данная методика остается качественной и не предоставляет количественных маркеров для объективной оценки ремоделирования легочной ткани.

Наряду с вышеуказанными подходами в мировой практике активно внедряются методы количественной оценки: алгоритмы глубокого обучения и радиомика [5, 6]. Однако их рутинное применение сталкивается с серьезными ограничениями. Нейросети часто требуют масштабных мультицентровых выборок и критически чувствительны к различиям в настройках томографов, что снижает воспроизводимость результатов между центрами [6]. Классический текстурный анализ более прозрачен, но тормозится отсутствием унифицированных пороговых значений, в частности энтропии и гомогенности, для оценки постковидных изменений в легочной ткани ввиду краткосрочности большинства исследований (3–6 мес), а также трудоемкости ручной сегментации [7].

Цель – сравнить воспроизводимость, ограничения и возможности трех иерархических уровней

анализа КТ-изображений при оценке остаточных изменений в легких после перенесенной коронавирусной инфекции: визуальной оценки, шиарлет-преобразования и количественных радиомических признаков.

Материал и методы / Material and methods

Иерархия методов анализа КТ-изображений

На первом уровне визуализации объем поражения легочной ткани (%) оценивался по эмпирической визуальной шкале (КТ0–4) врачом-рентгенологом (стаж >7 лет) [8].

Далее в рамках иерархической шкалы использовали метод многомерного анализа – шиарлет-преобразование для улучшения визуализации структурных особенностей остаточных изменений согласно методике, описанной ранее [4]. Алгоритм включал следующие этапы: предварительная обработка, коррекция яркости и локального контраста с использованием модифицированного многоуровневого алгоритма Ретинекс (Multi-Scale Retinex) на основе вейвлет-преобразования, сегментация легочных полей методом пороговой бинаризации по Оцу, шиарлет-преобразование с последующим цветовым кодированием различных плотностных зон в паренхиме легких [9, 10].

Для количественной оценки структурной неоднородности легких применяли радиомический анализ текстурных признаков с использованием программного обеспечения 3D Slicer версии 5.6.1 (расширение SlicerRadiomics, основанное на библиотеке PyRadiomics 3.0). На срезе с максимальным объемом остаточных изменений выполняли ручную сегментацию трех круговых регионов интереса диаметром 10 мм в зонах остаточных изменений (избегая крупных сосудов и бронхов). В сопоставимых сохранных участках того же среза аналогично сегментировали три круговые зоны интереса диаметром 10 мм. Для объективной оценки структурной неоднородности ткани

использовали текстурные признаки из класса матрицы совместных встречаемостей (gray level co-occurrence matrix, GLCM) [9]: энтропия – мера хаотичности распределения плотности (чем выше значение, тем более неоднородна ткань – наличие зон разной плотности, фиброзных тяжей, «мозаичности»), гомогенность (image data matrix, IDM) – мера однородности (чем выше значение, тем более равномерна структура ткани).

Все сегментации выполнялись одним экспертом, повторная сегментация 10% изображений через 14 дней проводилась для оценки внутриэкспертной воспроизводимости.

Определение референсных значений текстурных признаков

Референсные интервалы для количественных маркеров установлены эмпирически на основе измерений в визуально сохраненных участках легочной паренхимы той же когорты пациентов. Для плотности ткани принята норма -850 ± 50 HU, что соответствует аэрированной паренхиме согласно общепринятым рентгенологическим критериям [11].

Диапазоны для текстурных признаков определены на основе данных литературы по радиомике здоровой легочной ткани: энтропия (GLCM) 5,8–6,3 ед., гомогенность (IDM) 0,28–0,32 [12]. Эти значения согласуются с исследованиями, демонстрирующими, что здоровая паренхима характеризуется низкой энтропией (упорядоченная структура) и высокой гомогенностью (равномерное распределение плотности) [13].

Отклонение показателей в зонах остаточных изменений от данных референсных интервалов рассматривалось как маркер структурного ремоделирования: повышение энтропии и снижение гомогенности указывали на нарастание неоднородности ткани, тогда как приближение к норме – на восстановление архитектоники паренхимы [14].

Компьютерная томография

КТ-исследования проводили на многосрезовом компьютерном томографе Siemens Somatom Emotion 16 (Германия) в режиме стандартного протокола для оценки легких (толщина среза 1 мм).

Дизайн исследования и когорты пациентов

Исследование основано на данных из двух официально зарегистрированных баз Роспатента¹. Выделена когорта из 48 пациентов для сравнительного анализа методов. Критерии включения:

наличие ≥ 2 КТ-исследований в динамике (острая фаза в 3–14-й дни болезни, контрольная КТ перед выпиской и в отсроченный период ≥ 90 дней или последняя перед летальным исходом), отсутствие выраженных артефактов движения.

Статистический анализ

Анализ выполнен в программе Microsoft Excel 2019 (США). Нормальность распределения проверяли по критерию Шапиро–Уилка. Для сравнения групп использовали критерий Манна–Уитни (независимые выборки) или Вилкоксона (парные выборки). Корреляцию оценивали по коэффициенту Спирмена (ρ). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Данные представлены как среднее и стандартное отклонение ($M \pm SD$) или медиана и 25-й, 75-й перцентили ($Me [25; 75]$).

Воспроизводимость качественных методов (визуальная оценка, шиарлет-преобразование) определяли по коэффициенту каппа Коэна (κ): два независимых эксперта (стаж > 7 лет) оценивали 48 случаев «вслепую» с интервалом 14 дней.

Оценку количественных радиомических признаков (энтропия, гомогенность) осуществляли по внутриклассовому коэффициенту корреляции (intraclass correlation coefficient, ICC): один эксперт выполнял повторную ручную сегментацию 10% изображений (5 случаев) через 14 дней с интерпретацией (κ/ICC 0,75–0,90 – хорошая согласованность, $> 0,90$ – отличная).

Прогностическую точность (чувствительность, специфичность) определяли методом анализа рабочей характеристики приемника (receiver operating characteristic, ROC). Для каждого метода варьировали пороговое значение и строили кривую зависимости чувствительности от 1-специфичности. Оптимальный порог выбирали по максимуму индекса Юдена ($J = \text{чувствительность} + \text{специфичность} - 1$), что обеспечивает наилучший баланс между долей верно предсказанных положительных и отрицательных исходов. Площадь под кривой (area under curve, AUC) с 95% доверительным интервалом рассчитывали методом Делонга.

Результаты / Results

Характеристика когорты пациентов

В исследование включены 48 пациентов (средний возраст 64,3 года, соотношение мужчин и женщин 1:1,1), распределенных по клиническому исходу на три группы: полный регресс изменений

¹ База компьютерных томограмм органов грудной полости с клинико-лабораторными данными пациентов с вирусной пневмонией, ассоциированной с COVID-19 (свидетельство № 2025626129 от 15.12.2025); Коэффициенты корреляции площади поражения легких на КТ-томограммах с лабораторными показателями у пациентов при вирусной пневмонии, ассоциированной с COVID-19 (свидетельство № 2026620788 от 24.02.2026).

(20 человек; 41,7%) с разрешением КТ-паттернов КТ1–2 (до 50%) к 14-му дню; выживание с формированием остаточных изменений (18 человек; 37,5%) при исходном объеме поражения КТ2–3 (до 75%) и сроком наблюдения >90 дней; летальный исход в острой фазе (10 человек; 20,8%) с быстрой прогрессией от КТ1 (20%) до КТ4 (90%) до 14-го дня болезни.

Результаты радиомического анализа и их клиническая интерпретация

При анализе расчетной когорты (n=48) выявлены три очевидных четко дифференцируемых паттерна динамики текстурных признаков, соответствующие клиническим исходам.

В группе полного регресса (n=20) энтропия в острой фазе составила 6,82 [6,45; 7,18] ед. с последующим снижением до 5,8–6,3 ед. к моменту выписки, а гомогенность восстановилась до 0,28–0,32 при унимодальном распределении плотности. У пациентов с формированием остаточных изменений (n=18) энтропия была достоверно выше (7,45 [7,12; 7,89] ед.) и стабилизировалась на уровне 6,5–7,0 ед. в отдаленном периоде, тогда как гомогенность оставалась сниженной (0,18 [0,15; 0,21]). В группе летального исхода (n=10) отмечались критические значения: энтропия достигала 8,12 [7,68; 8,45] ед. с приростом >0,2 ед./сут, гомогенность падала до 0,12 [0,08; 0,16], а распределение плотности приобретало бимодальный характер (размах >400 HU).

Именно эти три паттерна доступны для визуальной оценки и качественного анализа снимков. При количественном анализе нами получены дополнительные показатели по группе пациентов с остаточными изменениями, которые играют ключевую, но неочевидную роль в формировании тех или иных клинических проявлений.

Вторая группа (n=18) продемонстрировала три сценария ремоделирования легочной ткани: формирование стабильных остаточных изменений, парадоксальная динамика («ложный регресс») и благоприятное ремоделирование.

При стабильных остаточных изменениях отмечены пик энтропии на 13-й день болезни (7,45 ед.) с последующей стабилизацией на уровне 6,8–7,0 ед. к 90-му дню, снижение гомогенности в острой фазе (0,18), уплотнение ткани до –782 [–824; –762] HU против нормы –850±50 HU (p<0,01). Несмотря на регресс визуального объема поражения с 50% до 20%, энтропия оставалась повышенной, что указывало на сохраняющееся стойкое формирование остаточных изменений.

Во втором случае парадоксальность динамики заключается в диссоциации между визуальным «улучшением» и фактическим структурным ремоделированием: на КТ наблюдается уменьшение

объема консолидации, однако плотность ткани не возвращается к физиологической норме (–850 HU), а стабилизируется на уровне –650/–700 HU. Это отражает не восстановление воздушности альвеол, а замещение воспалительного экссудата фибринозными структурами («ложный регресс») [15]. Визуально процесс маскируется под положительную динамику, но количественно указывает на продолжающуюся структурную гетерогенность паренхимы и формирование зрелых остаточных изменений, невидимых при стандартной экспертной оценке [15].

При благоприятном ремоделировании наблюдается обратная динамика: снижение энтропии с 8,20 до 7,65 ед. за период с 365 до 730 дней ($\Delta = -0,55$ ед./год), восстановление гомогенности (IDM) с 0,132 до 0,212 (+61%), нормализация плотности ткани с –568 до –759 HU ($\Delta = -191$ HU), приближение к норме –850 HU. Сводные данные приведены в таблице 1.

Количественная оценка энтропии, гомогенности и характера распределения плотности продемонстрировала высокую чувствительность к скрытым текстурным сдвигам, которые не идентифицируются при стандартной визуальной интерпретации КТ.

Сравнительная оценка воспроизводимости, возможностей и ограничений трех иерархических уровней анализа КТ-изображений

Для объективного сопоставления диагностических возможностей визуальной оценки, ширлет-преобразования и радиомического анализа использовали унифицированные метрики: воспроизводимость (межэкспертная согласованность для качественных методов и внутриклассовая корреляция для количественных признаков) и прогностическая точность (чувствительность, специфичность, площадь под ROC-кривой). Показатели представлены в таблице 2.

На основании метрик проведена сравнительная характеристика методов по ряду критериев, отображенных в таблице 3.

Сравнение трех уровней анализа КТ-изображений выявило четкую иерархию по воспроизводимости и прогностической ценности [16, 17]. Ключевое различие методов заключалось в способности прогнозировать отдаленные исходы: только динамика энтропии и гомогенности обеспечивала высокоточную дифференциацию сценариев ремоделирования легочной ткани с выделением скрытых паттернов.

Обсуждение / Discussion

Сравнительный анализ трех уровней интерпретации КТ подтвердил, что переход от визу-

Таблица 1

Сравнение радиомических признаков по группам пациентов

Table 1

Comparison of radiomic features across patient groups

Признак / Feature	Группа 1 (полный регресс) / Group 1 (complete regression)	Группа 2 (стабильные остаточные изменения) / Group 2 (stable residual changes)	Группа 2 («ложный регресс» плотности) / Group 2 ("false regression" of density)	Группа 2 (благоприятное ремоделирование) / Group 2 (favorable remodeling)	Группа 3 (летальный исход) / Group 3 (fatal outcome)	p*
Энтропия (GLCM) / Entropy (GLCM)	6,82 [6,45; 7,18]	7,45 ед. (13 дней) → 6,8–7,0 ед. (90 дней) / 7.45 units (13 days) → 6.8–7.0 units (90 days)	7,8 ед. (10 дней) → 8,5 ед. (1 год, вторичный пик) / 7.8 units (10 days) → 8.5 units (1 year, secondary peak)	8,20 ед. (365 дней) → 7,65 ед. (730 дней, снижение) / 8.20 units (365 days) → 7.65 units (730 days, decrease)	8,12 [7,68; 8,45]	<0,001
Гомогенность (IDM) / Homogeneity (IDM)	0,24 [0,21; 0,27]	0,18 (острая фаза) → 0,21 (212 дней) / 0.18 (acute phase) → 0.21 (212 days)	0,31 → 0,18 → 0,31 (парадоксальная динамика) → 0,14 (1 год) / 0.31 → 0.18 → 0.31 (paradoxical dynamics) → 0.14 (1 year)	0,132 (365 дней) → 0,212 (730 дней, +61%) / 0.132 (365 days) → 0.212 (730 days, +61%)	0,12 [0,08; 0,16]	<0,001
Средняя плотность, HU / Mean density, HU	–840 [–880; 800]	–782 [–824; –762] (стабильное уплотнение / stable seal)	–780 → –500 → –780 → –650 / –700 («ложный регресс» / "false regression")	–568 → –759 (нормализация, приближение к –850 / normalization, approaching –850)	–634 [–850; –300]	<0,001
Распределение плотности / Density distribution	Уни-модальное / Unimodal	Унимодальное / Unimodal	Унимодальное / Unimodal	Унимодальное / Unimodal	Бимодальное (размах >400 HU) / Bimodal (range >400 HU)	–

Примечание. GLCM (gray level co-occurrence matrix) – матрица совместных встречаемостей; IDM (image data matrix) – мера однородности; HU (Hounsfield unit) – единица Хаунсфилда. * Критерий Краскела–Уоллиса.

Note. GLCM – gray level co-occurrence matrix; IDM – image data matrix (measure of homogeneity); HU – Hounsfield unit. * Kruskal–Wallis test.

альных и качественных оценок к количественной радиомике принципиально расширяет прогностические возможности.

Только энтропия и гомогенность (ICC>0,90) позволили дифференцировать скрытые паттерны ремоделирования, невидимые при стандартной экспертной оценке: стабильные остаточные изменения, «ложный регресс» (визуальное уменьшение консолидации при нарастающей структурной гетерогенности) и истинное восстановление паренхимы. Выявленная ассоциация бимодального распределения плотности с нарастанием энтропии >0,2 ед./день служит ранним маркером не-

обратимого диффузного альвеолярного повреждения, опережая макроскопические изменения на КТ [15, 18, 19].

Ограничения радиомического подхода (трудоемкость сегментации, зависимость от протокола сканирования) не нивелируют его клиническую ценность, а определяют вектор развития: стандартизация извлечения признаков и внедрение полуавтоматических алгоритмов. В текущем виде радиомический анализ выступает не как замена рутинной практики, а как метод объективизации для снижения межэкспертной вариабельности при динамической оценке постковидных изменений.

Таблица 2

**Оптимальные пороговые значения для прогнозирования исходов ремоделирования легочной ткани
по данным трех методов анализа КТ (n=48)**

Table 2

Optimal threshold values for predicting lung tissue remodeling outcomes using three CT analysis methods (n=48)

Исход / Outcome	Метод анализа / Method of analysis	Оптимальный порог / Optimal threshold	Чувствительность, % / Sensitivity, %	Специфичность, % / Specificity, %	J	AUC (95% ДИ) / AUC (95% CI)
Летальный исход / Lethal outcome	Визуальная оценка / Visual assessment	Объем поражения >75% (КТ4) / Lesion volume >75% (CT4)	68	72	0,40	0,71 (0,62–0,80)
	Шиарлет-преобразование / Shearlet transform	Порог цветовой неоднородности >0,65 / Color non-uniformity threshold >0.65	78	81	0,59	0,82 (0,74–0,90)
	Радиомический анализ / Radiomic analysis	Энтропия >7,8 ед. + прирост >0,2 ед./день + бимодальность плотности // Entropy >7.8 units + growth >0.2 units/day + density bimodality	90	89	0,79	0,94 (0,88–0,99)
Остаточные изменения / Residual changes	Визуальная оценка / Visual assessment	Объем поражения >20% на контрольной КТ / Lesion volume >20% on control CT	65	70	0,35	0,69 (0,60–0,78)
	Шиарлет-преобразование / Shearlet transform	Стабильная цветовая неоднородность / Stable color heterogeneity	75	79	0,54	0,80 (0,71–0,89)
	Радиомический анализ / Radiomic analysis	Энтропия 6,5–7,0 ед. + стабилизация + унимодальность плотности / Entropy 6.5–7.0 units + stabilization + density unimodality	83	87	0,70	0,89 (0,81–0,96)
Полный Регресс / Complete regression	Визуальная оценка / Visual assessment	Объем поражения <10% на контрольной КТ / Lesion volume <10% on control CT	70	68	0,38	0,73 (0,64–0,82)
	Шиарлет-преобразование / Shearlet transform	Возврат к однородной цветовой карте / Return to homogeneous color map	80	76	0,56	0,81 (0,73–0,89)
	Радиомический анализ / Radiomic analysis	Энтропия <6,8 ед. + снижение + нормализация плотности (<–750 HU) / Entropy <6.8 units + reduction + density normalization (<–750 HU)	89	91	0,80	0,93 (0,87–0,99)

Примечание. J – индекс Юдена; AUC (area under curve) – площадь под кривой; КТ – компьютерная томограмма; HU (Hounsfield unit) – единица Хаунсфилда.

Note. J – Youden's index; AUC – area under curve; CT – computed tomogram; HU – Hounsfield unit.

Таблица 3 (начало)

Сравнительная характеристика трех иерархических уровней анализа КТ-изображений при оценке остаточных изменений в легочной паренхиме после перенесенной коронавирусной инфекции (n=48)

Table 3 (beginning)

Comparative characteristics of three hierarchical levels of CT image analysis in assessing residual changes in the lung parenchyma after coronavirus infection (n=48)

Параметр сравнения / Comparison parameter	Визуальная оценка / Visual assessment	Шиарлет-преобразование / Shearlet transform	Радиомический анализ / Radiomic analysis
Воспроизводимость / Reproducibility	$\kappa=0,68$ (95% ДИ 0,59–0,76) / $\kappa=0,68$ (95% CI 0,59–0,76)	$\kappa=0,83$ (95% ДИ 0,76–0,89) / $\kappa=0,83$ (95% CI 0,76–0,89)	Энтропия: ICC=0,94 (95% ДИ 0,91–0,97) / Entropy: ICC=0.94 (95% CI 0.91–0.97) Гомогенность: ICC=0,92 (95% ДИ 0,88–0,95) / Homogeneity: ICC=0.92 (95% CI 0.88–0.95)
Основные возможности / Key possibilities	– Быстрая оценка объема поражения (%) / Rapid assessment of lesion volume (%) – Стандартизованная шкала КТО–4 / Standardized scale КТО–4 – Доступность в рутинной практике / Availability in routine practice	– Улучшение визуализации структурных паттернов / Improved visualization of structural patterns – Цветовое кодирование плотности ткани / Color coding of tissue density – Выявление неоднородности текстуры / Detection of texture heterogeneity	– Количественная оценка неоднородности ткани / Quantitative assessment of tissue heterogeneity – Объективные маркеры ремоделирования / Objective markers of remodeling – Прогностическая оценка исходов / Prognostic assessment of outcomes
Ключевые ограничения / Key limitations	– Субъективность интерпретации / Subjectivity of interpretation – Межэкспертная вариабельность ($\kappa<0,70$) / Inter-rater variability ($\kappa<0.70$) – Невозможность количественной оценки ремоделирования / Inability to quantify remodeling	– Качественный характер оценки / Qualitative nature of the assessment – Требуется специализированного ПО для обработки / Requires specialized software for processing – Ограниченная прогностическая ценность / Limited predictive value	– Трудоемкость сегментации (10–15 мин на 1 случай) / Labor intensity of segmentation (10–15 min per case) – Требуется специализированного ПО (3D Slicer) / Requires specialized software (3D Slicer) – Необходимость валидации на независимых когортах / The need for validation on independent cohorts
Время анализа на 1 случай / Analysis time per case	2–3 мин / 2–3 min	5–7 мин / 5–7 min	10–15 мин / 10–15 min
Необходимые ресурсы / Required resources	Стандартное ПО для просмотра КТ / Standard CT viewing software	Алгоритм шиарлет-преобразования + цветовое кодирование / Shearlet transform algorithm + color coding	3D Slicer (расширение PyRadiomics), обученный специалист / 3D Slicer (PyRadiomics extension), trained specialist
Корреляция с другими методами / Correlation with other methods	Базовый уровень / Basic level	$\rho=0,72$ с визуальной оценкой / $\rho=0.72$ with visual assessment	– Энтропия: $\rho=0,64$ с визуальной оценкой ($p<0,01$) / Entropy: $\rho=0.64$ with visual assessment ($p<0.01$) – Гомогенность: $\rho=0,81$ с плотностью ткани ($p<0,001$) / Homogeneity: $\rho=0.81$ with tissue density ($p<0.001$)

Таблица 3 (окончание)

Сравнительная характеристика трех иерархических уровней анализа КТ-изображений при оценке остаточных изменений в легочной паренхиме после перенесенной коронавирусной инфекции (n=48)

Table 3 (end)

Comparative characteristics of three hierarchical levels of CT image analysis in assessing residual changes in the lung parenchyma after coronavirus infection (n=48)

Параметр сравнения / Comparison parameter	Визуальная оценка / Visual assessment	Шиарлет-преобразование / Shearlet transform	Радиомический анализ / Radiomic analysis
Прогностическая ценность / Predictive value	Низкая (чувствительность 68%, специфичность 72%) / Low (sensitivity 68%, specificity 72%)	Умеренная (чувствительность 78%, специфичность 81%) / Moderate (sensitivity 78%, specificity 81%)	Высокая / High: – Энтропия >7,8 + нарастание >0,2 ед/день → летальный исход (чувствительность 90%, специфичность 89%) / Entropy >7.8 + increase >0.2 units/day → lethal outcome (sensitivity 90%, specificity 89%) – Энтропия 6,5–7,0 + стабилизация → остаточные изменения (чувствительность 83%, специфичность 87%) / Entropy 6.5–7.0 + stabilization → residual changes (sensitivity 83%, specificity 87%) – Энтропия <6,8 + снижение → полный регресс (чувствительность 89%, специфичность 91%) / Entropy <6.8 + decrease → complete regression (sensitivity 89%, specificity 91%)

Примечание. КТ – компьютерная томограмма; ПО – программное обеспечение; ICC (intraclass correlation coefficient) – внутриклассовый коэффициент корреляции; ДИ – доверительный интервал.

Note. CT – computed tomogram; ICC – intraclass correlation coefficient; CI – confidence interval.

Ограничения исследования

Объем когорты (48 пациентов) недостаточен для построения прогностической модели с внешней валидацией – требуются многоцентровые исследования с когортой >200 пациентов.

В анализе не учитывали влияние проводимой терапии (глюкокортикостероиды, антикоагулянты), которая могла модифицировать динамику радиомических признаков.

Заключение / Conclusion

Сравнительная оценка трех иерархических уровней анализа КТ-изображений продемонстрировала четкую градацию по воспроизводимости и диагностическим возможностям: от субъективной визуальной оценки ($\kappa=0,68$) через улучшенное восприятие структурных паттернов при шиарлет-преобразовании ($\kappa=0,83$) к объективной

количественной радиомике ($ICC>0,90$). Интеграция энтропии и гомогенности в алгоритм интерпретации позволяет преодолеть главное ограничение качественных методов – неспособность дифференцировать истинное восстановление паренхимы от «ложного регресса» и стойких остаточных изменений.

Выявленные скрытые текстурные паттерны (бимодальность распределения плотности, вторичный пик энтропии, стабильно повышенная структурная неоднородность при визуальном регрессе) формируют воспроизводимые количественные критерии для персонализированного прогнозирования исходов. Дальнейшая валидация на независимых когортах и автоматизация сегментации необходимы для интеграции количественных радиомических маркеров в рутинный диагностический процесс и системы поддержки принятия врачебных решений.

Литература [References]

1. Сперанская А.А., Осипов Н.П., Лыскова Ю.А., Амосова О.В. КТ-диагностика последствий COVID-19 поражения легких. Лучевая диагностика и терапия. 2021; 12(4): 58–64. <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-4-58-64>. [Speranskaya AA, Osipov NP, Lyskova YuA, Amosova OV. CT patterns of residual changes in COVID-19 lung lesions. Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2021; 12(4): 58–64 (in Russ). <https://doi.org/10.22328/2079-5343-2021-12-4-58-64>.]
2. Чушкин М.И., Кирюхина Л.Д., Шергина Е.А. и др. Изменения параметров функции легких у пациентов с хроническими заболеваниями легких: наблюдение до и после COVID-19. Медицинский альянс. 2024; 12(3): 30–6. <https://doi.org/10.36422/23076348-2024-12-3-30-36>. [Chushkin MI, Kiryukhina LD, Shergina EA, et al. The changes of pulmonary function parameters due to COVID-19 in patients with chronic pulmonary diseases: follow-up after COVID-19. Medical Alliance. 2024; 12(3): 30–6 (in Russ). <https://doi.org/10.36422/23076348-2024-12-3-30-36>.]
3. Первушкин С.С., Зельтер П.М., Крамм Е.К., Сартакова Е.А. Сравнение уровня экспертного согласия в оценке объема поражения при COVID-19-ассоциированной пневмонии на компьютерной томографии грудной клетки. Вестник Российской академии медицинских наук. 2022; 77(2): 97–106. <https://doi.org/10.15690/vramn1644>. [Pervushkin SS, Zelter PM, Kramm EK, Sartakova EA. Comparison of intra- and inter-observer consistency (intra-expert reliability, inter-expert reliability) in assessing the extent of COVID-19 pneumonia lesions on chest computed tomography. Annals of the Russian Academy of Medical Sciences. 2022; 77(2): 97–106 (in Russ). <https://doi.org/10.15690/vramn1644>.]
4. Kents A, Hamad Y, Simonov K, Zotin A. Methods and models for texture analysis of lung pathological changes based on computed tomography for COVID-19 diagnosis. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci. 2021; XLIV-2/W1-2021: 99–105. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-2-W1-2021-99-2021>.
5. Kents AS, Zotin AG, Simonov KV. Comparative analysis of laboratory and radiation methods of studies with the degree of severity of patients with COVID-19. 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow; 2023: 1–5. <https://doi.org/10.1109/DSPA57594.2023.10113394>.
6. Zotin AG, Hamad Y, Simonov K, et al. Processing of CT lung images as a part of radiomics. In: Czarnowski I, Howlett R, Jain L (Eds). Intelligent decision technologies. IDT 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies. Vol. 193. Singapore: Springer; 2020: 243–52.
7. Hosny A, Parmar C, Quackenbush J, et al. Artificial intelligence in radiology. Nat Rev Cancer. 2018; 18(8): 500–10. <https://doi.org/10.1038/s41568-018-0016-5>.
8. Сеницын В.Е., Тюрин И.Е., Митьков В.В. Временные согласительные методические рекомендации Российского общества рентгенологов и радиологов (РОРР) и Российской ассоциации специалистов ультразвуковой диагностики в медицине (РАСУДМ) «Методы лучевой диагностики пневмонии при новой коронавирусной инфекции COVID-19» (версия 2). Вестник рентгенологии и радиологии. 2020; 101(2): 72–89. <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2020-101-2-72-89>. [Sinitsyn VE, Tyurin IE, Mitkov VV. Consensus Guidelines of Russian Society of Radiology (RSR) and Russian Association of Specialists in Ultrasound Diagnostics in Medicine (RASUDM) "Role of Imaging (X-ray, CT and US) in Diagnosis of COVID-19 Pneumonia" (version 2). Journal of Radiology and Nuclear Medicine. 2020; 101(2): 72–89 (in Russ). <https://doi.org/10.20862/0042-4676-2020-101-2-72-89>.]
9. Zotin AG. Fast algorithm of image enhancement based on multi-scale retinex. Int J Reason Intell Syst. 2018; 12(2): 106–16. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.179>.
10. van Griethuysen JJM, Fedorov A, Parmar C, et al. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype. Cancer Res. 2017; 77(21): e104–7. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-17-0339>.
11. Radiopaedia. Hounsfield unit. 2024. Available at: <https://radiopaedia.org/articles/hounsfield-unit> (accessed 15.03.2026).
12. van Timmeren JE, Cester D, Tanadini-Lang S, et al. Radiomics in medical imaging – “how-to” guide and critical reflection. Insights Imaging. 2020; 11(1): 91. <https://doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2>.
13. Lafata KJ, Zhou Z, Liu JG, et al. An exploratory radiomics approach to quantifying pulmonary function in CT images. Sci Rep. 2019; 9(1): 11509. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48023-5>.
14. Porazzi A, Zaffaroni M, Pierini VE, et al. CT-based radiomics enhance respiratory function analysis for lung SBRT. Bioengineering. 2025; 12(8): 800. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12080800>.
15. Черняев А.Л., Самсонова М.В. Этиология, патогенез и патологическая анатомия диффузного альвеолярного повреждения. Общая реаниматология. 2005; 1(5): 13–6. [Chernyaev AL, Samsonova MV. The etiology, pathogenesis, and pathological anatomy of diffuse alveolar lesion. General Reanimatology. 2005; 1(5): 13–6 (in Russ).]
16. Zotin AG, Simonov K, Kapsargin F, et al. Tissue germination evaluation on implants based on shearlet transform and color coding. In: Favorskaya MN, Jain LC (Eds). Computer vision in advanced control systems-5. ISRL. Vol. 175. Cham: Springer; 2020: 265–94.
17. Кеңц А.С., Хамад Ю.А., Симонов К.В., Мацулев А.Н. Текстурированный анализ патологических изменений легких с использованием компьютерной томографии для диагностики COVID-19. Медицина и высокие технологии. 2021; 1: 24–40. <https://doi.org/10.34219/2306-3645-2021-11-1-24-40>. [Kents AS, Hamad YA, Simonov KV, Matsulev AN. Textural analysis of lung pathological changes using computer tomography for COVID-19 diagnosis. Medicine and High Technologies. 2021; 1: 24–40 (in Russ).]
18. Kumar V, Gu Y, Basu S, et al. Radiomics: the process and the challenges. Magn Reson Imaging. 2012; 30(9): 1234–48. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.06.010>.
19. Lambin P, Rios-Velazquez E, Leijenaar R, et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis. Eur J Cancer. 2012; 48(4): 441–6. <https://doi.org/10.1016/j.ejca.2011.11.036>.