



ЛУЧЕВАЯ ДИАГНОСТИКА/RADIATION DIAGNOSTICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114> EDN: TNOYVS

СРАВНЕНИЕ СЕГМЕНТАРНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОТОННОЙ ПЛОТНОСТИ ЖИРОВОЙ ФРАКЦИИ ПЕЧЕНИ ПО ДАННЫМ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Научная статья

Савченков Ю.Н.^{1,*}, Труфанов Г.Е.², Фокин В.А.³, Ионова Е.А.⁴, Савченкова А.П.⁵, Мелтонян А.Р.⁶, Гальян Т.Н.⁷, Аракелов С.Э.⁸¹ ORCID : 0000-0002-8258-522X;² ORCID : 0000-0002-1611-5000;³ ORCID : 0000-0002-2937-6322;⁴ ORCID : 0000-0002-6084-2061;⁵ ORCID : 0009-0005-0100-0306;⁶ ORCID : 0000-0002-5149-4667;⁷ ORCID : 0000-0003-4751-5119;⁸ ORCID : 0000-0003-3911-8543;^{1,8} Городская клиническая больница имени В.П. Демихова Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация^{2,3,6} Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Российская Федерация⁴ Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна Федерального медико-биологического агентства России, Москва, Российская Федерация⁵ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация⁷ Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (yura_savchenkov[at]mail.ru)

Аннотация

Актуальность. Количественная оценка стеатоза печени по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) на основе протонной плотности жировой фракции широко применяется в клинической практике. При этом сегментарная неоднородность распределения жировой инфильтрации может влиять на сопоставимость сегментарных и интегральных измерений и воспроизводимость локальных оценок.

Цель. Сравнить сегментарные и интегральные измерения протонной плотности жировой фракции печени и оценить влияние количества сегментов на воспроизведение среднеченочного значения.

Материал и методы. В ретроспективное исследование включен 241 пациент, которым выполнена мультипараметрическая МРТ печени с расчетом протонной плотности жировой фракции. Проведен сегментарный анализ по классификации Couinaud. Рассчитана абсолютная ошибка воспроизведения среднеченочного значения при использовании различных комбинаций сегментов. Статистический анализ выполнен с применением непараметрических критериев и FDR-коррекции (FDR < 0,05).

Результаты. Сегментарные значения протонной плотности жировой фракции демонстрировали вариабельность относительно интегрального показателя. Медиана абсолютной ошибки одиночного сегментарного измерения в ряде сегментов превышала 1%. При использовании двух сегментов медиана абсолютной ошибки воспроизведения среднеченочного значения составила 0,33% [0,19; 0,70], при трех сегментах — 0,25% [0,14; 0,56] (p < 0,001). Дальнейшее увеличение числа сегментов сопровождалось дополнительным снижением ошибки.

Заключение. Точность воспроизведения интегрального показателя протонной плотности жировой фракции зависит от числа анализируемых сегментов. Использование трех и более сегментов уменьшает вариабельность относительно среднеченочного значения.

Ключевые слова: печень, стеатоз, протонная плотность жировой фракции, магнитно-резонансная томография, МРТ, сегментарный анализ.

A COMPARISON OF SEGMENTAL AND INTEGRAL MEASUREMENTS OF PROTON DENSITY IN THE LIPID FRACTION OF THE LIVER BASED ON MAGNETIC RESONANCE IMAGING DATA

Research article

Savchenkov Y.N.^{1,*}, Trufanov G.Y.², Fokin V.A.³, Ionova E.A.⁴, Savchenkova A.P.⁵, Meltonyan A.R.⁶, Galyan T.N.⁷, Arakelov S.E.⁸¹ ORCID : 0000-0002-8258-522X;² ORCID : 0000-0002-1611-5000;³ ORCID : 0000-0002-2937-6322;⁴ ORCID : 0000-0002-6084-2061;⁵ ORCID : 0009-0005-0100-0306;⁶ ORCID : 0000-0002-5149-4667;⁷ ORCID : 0000-0003-4751-5119;



⁸ORCID : 0000-0003-3911-8543;

^{1,8}V.P. Demikhov Department of Health of the city of Moscow, Moscow, Russian Federation

^{2,3,6}National Medical Research Center named after V.A. Almazov, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴Burnazyan Federal Biophysical Medical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russian Federation

⁵Scientific and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Department of Health, Moscow, Russian Federation

⁷Petrovsky Russian Scientific Center of Surgery, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (yura_savchenkov[at]mail.ru)

Abstract

Relevance. Quantitative evaluation of liver steatosis using magnetic resonance imaging (MRI) based on the proton density of the lipid fraction is widely used in clinical practice. However, segmental heterogeneity in the distribution of lipid infiltration may affect the comparability of segmental and integral measurements and the reproducibility of local assessments.

Objective. To compare segmental and integral measurements of proton density in the lipid fraction of the liver and to evaluate the influence of the number of segments on the reproducibility of the mean hepatic value.

Materials and methods. This retrospective study included 241 patients who underwent multiparametric liver MRI with calculation of the proton density of the lipid fraction. A segmental analysis was performed using the Couinaud classification. The absolute error in reproducing the mean hepatic value was calculated when using various combinations of segments. Statistical analysis was performed using non-parametric tests and FDR correction (FDR <0,05).

Results. Segment-specific values of proton density in the lipid fraction showed variability relative to the integral value. The median absolute error of a single segment-specific measurement exceeded 1% in a number of segments. When using two segments, the median absolute error in reproducing the mean hepatic value was 0,33% [0,19; 0,70]; with three segments, it was 0,25% [0,14; 0,56] (p < 0,001). A further increase in the number of segments was accompanied by an additional reduction in error.

Conclusion. The accuracy of the integral proton density value for the lipid fraction depends on the number of segments analysed. Using three or more segments reduces the variability relative to the mean hepatic value.

Keywords: liver, steatosis, proton density of the lipid fraction, magnetic resonance imaging, MRI, segmental analysis.

Введение

Стеатоз печени широко распространен у пациентов с метаболическими нарушениями и может прогрессировать с формированием стеатогепатита и фиброзных изменений [1]. Количественная оценка стеатоза по данным МРТ на основе протонной плотности жировой фракции рассматривается как воспроизводимая неинвазивная методика количественной оценки жировой инфильтрации печени [2], [3]. Ряд исследований показал высокую точность и воспроизводимость данной методики при сравнении с референсными методами оценки стеатоза [4], [5].

В большинстве исследований протонная плотность жировой фракции, полученная при локальных измерениях, интерпретируется как интегральный показатель жировой инфильтрации печени [6], [7]. Однако данные МРТ свидетельствуют о неоднородности распределения жировой инфильтрации в паренхиме печени, что может влиять на сопоставимость сегментарных и интегральных значений [8], [9]. Минимальные требования к количеству сегментов, обеспечивающие воспроизведение среднечечного показателя, изучены недостаточно [10], [11].

Цель исследования — сопоставить сегментарные и интегральные измерения протонной плотности жировой фракции печени и оценить влияние количества сегментов на воспроизведение среднечечного значения.

Методы и принципы исследования

Ретроспективное исследование включило 241 пациента (131 женщина, 110 мужчин, средний возраст 50,1 ± 13,3 года), которым выполнена мультипараметрическая МРТ органов брюшной полости с количественной оценкой протонной плотности жировой фракции печени. По среднечечному значению протонной плотности жировой фракции 164 пациента не имели признаков стеатоза, у 60 выявлена легкая степень, у 9 — умеренная, у 8 — выраженная степень жировой инфильтрации. Стратификацию проводили по следующим порогам: отсутствие стеатоза <6,4%, стеатоз 1 степени — 6,4–17,4%, стеатоз 2 степени — 17,4–22,1%, стеатоз 3 степени — >22,1%.

Исследования проводили на магнитно-резонансном томографе Magnetom Vida (Siemens, Германия) с индукцией магнитного поля 3 Тл. Протонную плотность жировой фракции определяли по картам, полученным с применением трехмерной мультиэховой последовательности 3D VIBE q-DIXON с коррекцией T2*-затухания. Постобработку выполняли в системе Vitrea® Advanced Visualization (Canon Medical Informatics, Inc., США).

Сегментарный анализ осуществляли в соответствии с классификацией Couinaud. В каждом сегменте на аксиальных изображениях формировали зоны интереса максимальной площади с исключением сосудов, желчных протоков, очаговых образований и субкапсулярных участков (рис. 1).

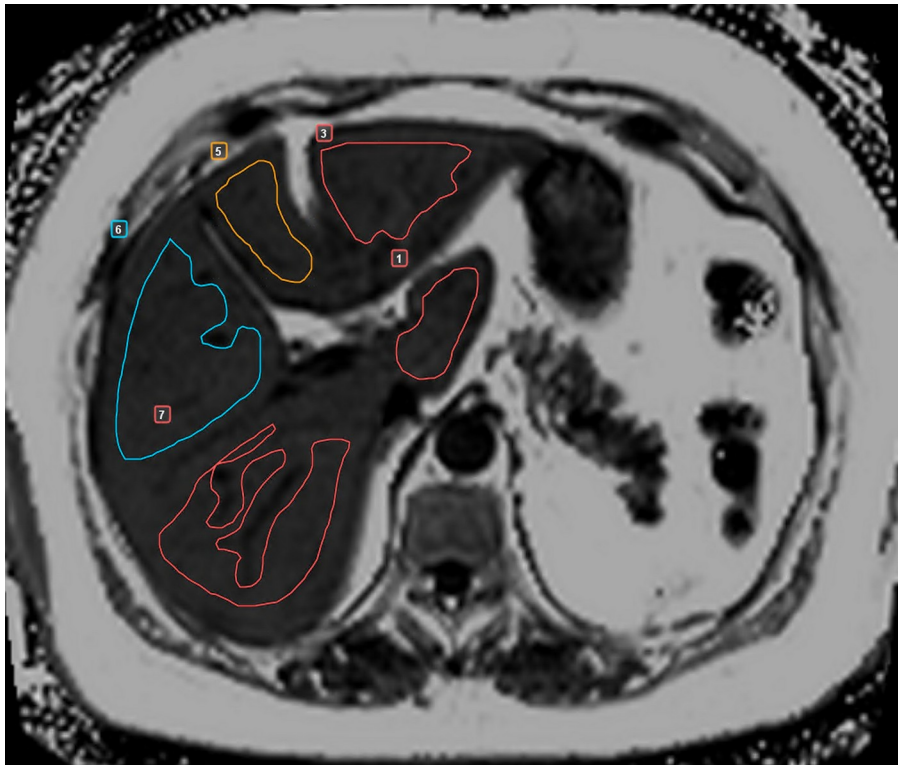


Рисунок 1 - Пример измерений протонной плотности жировой фракции в S1, S3, S4b, S5 и S6 печени
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.1>

Среднепеченочное значение рассчитывали как среднее по всем сегментам печени. Дополнительно анализировали различные комбинации сегментов для оценки влияния их количества на воспроизведение интегрального показателя.

Статистическую обработку выполняли в IBM SPSS Statistics 23.0. Использовали непараметрические методы: коэффициент ранговой корреляции Спирмена, критерии Манна-Уитни, Крускала-Уоллиса и Вилкоксона для связанных выборок. Согласие между сегментарными и интегральными значениями оценивали методом Бланда-Алтмана. Для учета множественных сравнений применяли коррекцию уровня значимости по методу Бенджамини-Хохберг. В анализ включали результаты при FDR <0,05.

Основные результаты

Сегментарный анализ протонной плотности жировой фракции выявил вариабельность значений между сегментами печени с отклонениями различной величины относительно среднепеченочного показателя (рис. 2).

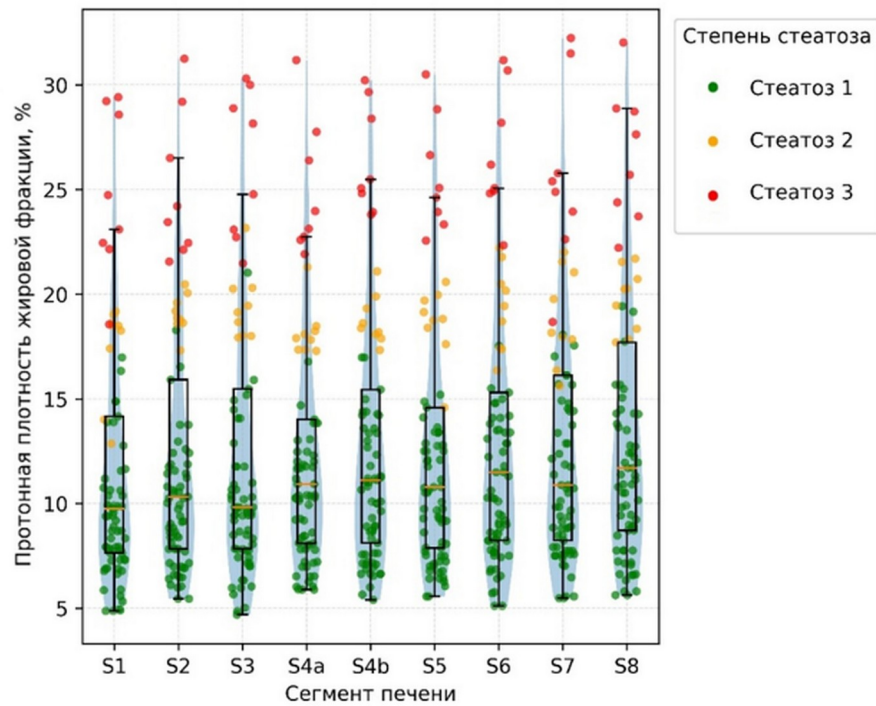


Рисунок 2 - Распределение значений протонной плотности жировой фракции по сегментам печени у пациентов со стеатозом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.2>

Количественные характеристики сегментарных значений и медианы их отклонений от интегрального показателя представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Сегментарные характеристики протонной плотности жировой фракции и отклонения от среднечечного значения

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.3>

Сегмент	Протонная плотность жировой фракции, медиана [Q1; Q3], %	Отклонение сегментарного значения протонной плотности жировой фракции от среднечечного (сегмент — среднее), медиана, %
S1	9,81 [7,65; 14,34]	-0,976
S2	10,43 [7,83; 16,07]	-0,396
S3	9,83 [7,84; 15,58]	-0,155
S4a	10,93 [8,11; 14,19]	-0,226
S4b	11,16 [8,28; 15,83]	0,304
S5	10,79 [7,88; 14,59]	-0,099
S6	11,49 [8,31; 15,35]	0,548
S7	11,13 [8,41; 16,19]	0,393
S8	11,82 [8,86; 17,71]	0,853

Абсолютная ошибка одиночного сегментарного измерения, определяемая как модуль разности между сегментарным и среднечечным значением, варьировала в зависимости от выбранного сегмента (рис. 3). В ряде сегментов медиана абсолютной ошибки превышала 1%.

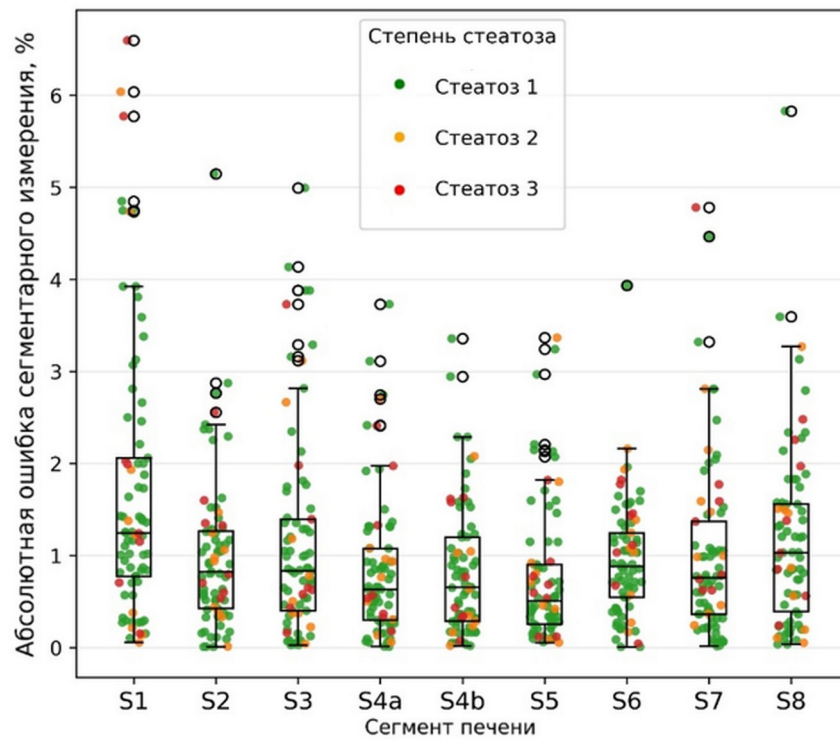


Рисунок 3 - Абсолютная ошибка одиночного сегментарного измерения протонной плотности жировой фракции относительно среднепеченочного значения
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.4>

При междолевом анализе у пациентов со стеатозом среднее значение протонной плотности жировой фракции правой доли статистически значимо превышало показатель левой доли (критерий Вилкоксона, $p = 0,002$) (рис. 4).

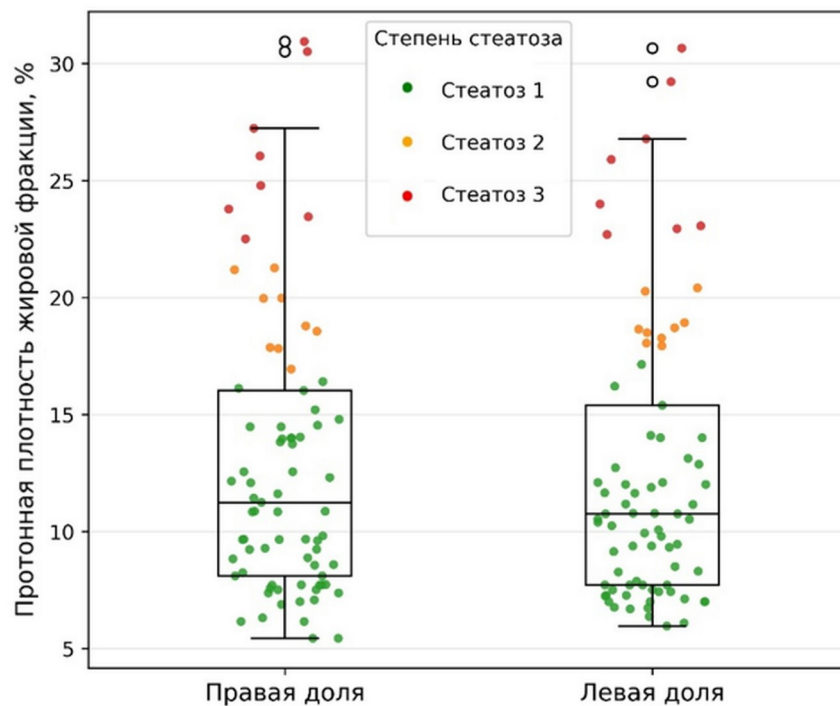


Рисунок 4 - Сопоставление средних значений протонной плотности жировой фракции правой и левой долей печени у пациентов со стеатозом
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.5>

Для оценки воспроизведения интегрального показателя проанализированы различные комбинации сегментов. При использовании двух сегментов медиана абсолютной ошибки составила 0,33% [0,19; 0,70]. При включении трех сегментов, расположенных в обеих долях печени, медиана ошибки снижалась до 0,25% [0,14; 0,56] ($p < 0,001$).

Среди отдельных комбинаций трех сегментов наиболее точно воспроизведение среднечечного значения протонной плотности жировой фракции обеспечивала комбинация S2 + S5 + S7. Сопоставимую точность демонстрировали и другие комбинации сегментов, включающие сегменты обеих долей печени, в частности S2 + S4a + S6 и S2 + S4a + S7. В анализируемых комбинациях сегменты были распределены между правой и левой долями печени, тогда как использование сегментов только одной доли не обеспечивало сопоставимой точности воспроизведения среднечечного показателя.

При использовании четырех сегментов медиана ошибки составила 0,21% [0,10; 0,45], при пяти – 0,16% [0,08; 0,36]. Снижение ошибки при увеличении числа сегментов более трех носило менее выраженный характер (рис. 5).

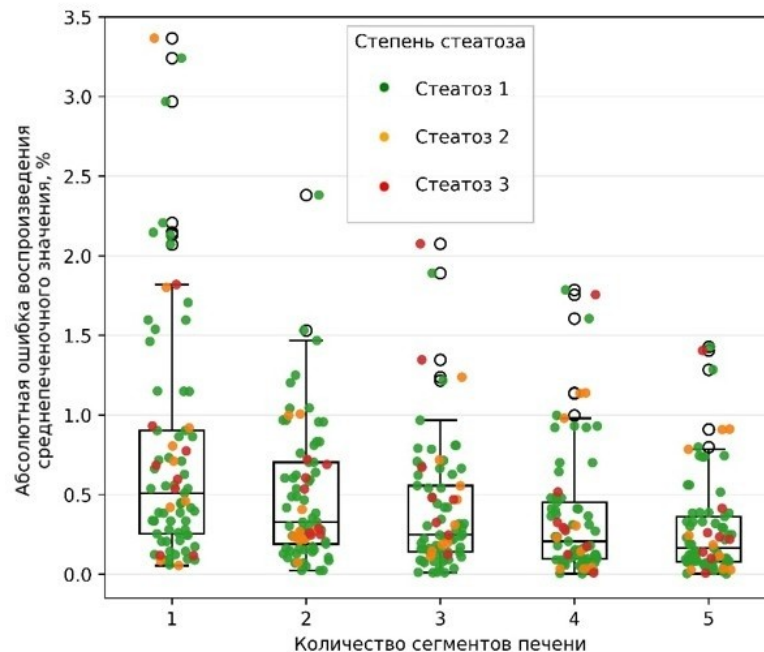


Рисунок 5 - Зависимость абсолютной ошибки воспроизведения среднечечного значения протонной плотности жировой фракции от количества сегментов печени

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.166.114.6>

Таким образом, результаты анализа показали, что точность воспроизведения среднечечного значения протонной плотности жировой фракции существенно варьирует в зависимости от количества анализируемых сегментов печени. Полученные данные формируют количественную основу для последующей интерпретации пространственной неоднородности стеатоза печени и обсуждения методологических ограничений локальных подходов к его оценке.

Обсуждение

Полученные результаты подтверждают вариабельность сегментарных значений протонной плотности жировой фракции печени и наличие отклонений от среднечечного показателя. Аналогичные особенности распределения жировой инфильтрации по данным МРТ ранее описаны в литературе [12], [13], [14].

Несмотря на высокую диагностическую точность протонной плотности жировой фракции как количественного биомаркера стеатоза [15], [16], локальные измерения отражают ограниченный объем паренхимы. В условиях неоднородного распределения жировой инфильтрации выбор сегмента может влиять на величину отклонения от интегрального показателя, что соответствует данным исследований, посвященных источникам вариабельности количественной оценки стеатоза [17], [18], [19].

В настоящем исследовании медиана абсолютной ошибки одиночного сегментарного измерения в ряде сегментов превышала 1%. В диапазоне значений, соответствующих стеатозу 1 степени, такое абсолютное отклонение эквивалентно относительному изменению показателя примерно на 6–16% в зависимости от исходного уровня протонной плотности жировой фракции, при стеатозе 2 степени — около 4–6%, а при стеатозе 3 степени — менее 5%, при этом влияние абсолютной ошибки наиболее выражено при низких значениях показателя и уменьшается по мере его увеличения.

Анализ воспроизведения интегрального показателя показал, что использование одного или двух сегментов сопровождается большей величиной абсолютной ошибки по сравнению с комбинациями из трех и более сегментов. При включении трех сегментов, расположенных в обеих долях печени, достигалось снижение медианы абсолютной



ошибки по сравнению с двумя сегментами ($p < 0,001$). Дальнейшее увеличение числа сегментов сопровождалось дополнительным уменьшением ошибки, однако выраженность эффекта снижалась.

Таким образом, сегментарные измерения протонной плотности жировой фракции демонстрируют зависимость точности воспроизведения интегрального показателя от числа анализируемых сегментов. Использование нескольких анатомически разобобщенных зон интереса уменьшает вариабельность относительно среднечечного значения.

К ограничениям исследования относится неравномерное распределение пациентов по степеням стеатоза с преобладанием отсутствия или легкой степени жировой инфильтрации. Дополнительным ограничением является моноцентрический характер исследования и выполнение всех МР-исследований на оборудовании одного производителя (Siemens), что может ограничивать прямую экстраполяцию полученных результатов на другие МР-системы.

Заключение

Сегментарные значения протонной плотности жировой фракции печени демонстрируют вариабельность относительно среднечечного показателя. Использование одного или двух сегментов сопровождается большей величиной абсолютной ошибки воспроизведения интегрального значения по сравнению с комбинациями из трех и более сегментов. При включении трех сегментов, расположенных в обеих долях печени, медиана абсолютной ошибки статистически значимо снижается по сравнению с двумя сегментами. Дальнейшее увеличение числа сегментов сопровождается дополнительным уменьшением ошибки.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Younossi Z.M. The global epidemiology of nonalcoholic fatty liver disease and nonalcoholic steatohepatitis among patients with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis / Z.M. Younossi, P. Golabi, J.K. Price [et al.] // *Clin Gastroenterol Hepatol.* — 2024. — Vol. 22. — № 10. — P. 1999–2010.e8. — DOI: 10.1016/j.cgh.2024.03.006.
2. Caussy C. Non-invasive, quantitative assessment of liver fat by MRI-PDFF as an endpoint in NASH trials / C. Caussy, S.B. Reeder, C.B. Sirlin [et al.] // *Hepatology.* — 2018. — Vol. 68. — № 2. — P. 763–772. — DOI: 10.1002/hep.29797.
3. Tang A. Accuracy of MR imaging-estimated proton density fat fraction for classification of histologic steatosis grades / A. Tang, A. Desai, G. Hamilton [et al.] // *Radiology.* — 2015. — Vol. 274. — № 2. — P. 416–425. — DOI: 10.1148/radiol.14140754.
4. Yokoo T. Linearity, bias, and precision of hepatic proton density fat fraction measurements: a meta-analysis / T. Yokoo, S.D. Serai, A. Pirasteh [et al.] // *Radiology.* — 2018. — Vol. 286. — № 2. — P. 486–498. — DOI: 10.1148/radiol.2017170550.
5. Rinella M.E. A multisociety Delphi consensus statement on new fatty liver disease nomenclature / M.E. Rinella, J.V. Lazarus, V. Ratziu [et al.] // *Hepatology.* — 2023. — Vol. 78. — № 6. — P. 1966–1986. — DOI: 10.1097/HEP.0000000000000520.
6. Wibulpolprasert P. Correlation between MRI-proton density fat fraction and liver biopsy to assess hepatic steatosis in obesity / P. Wibulpolprasert, B. Subpinyo, S. Chirnakorn [et al.] // *Scientific Reports.* — 2024. — Vol. 14. — Art. № 6895. — DOI: 10.1038/s41598-024-6895-y.
7. Qadri S. Marked difference in liver fat measured by histology versus magnetic resonance proton density fat fraction: a meta-analysis / S. Qadri, E. Vartiainen, M. Lahelma [et al.] // *JHEP Reports.* — 2024. — Vol. 6. — № 1. — Art. № 100928. — DOI: 10.1016/j.jhepr.2023.100928.
8. Martí-Aguado D. Automated whole-liver MRI segmentation to assess steatosis and iron quantification in chronic liver disease / D. Martí-Aguado, Á. Alberich-Bayarri, J.L. Martín-Rodríguez [et al.] // *Radiology.* — 2022. — Vol. 302. — № 2. — P. 345–354. — DOI: 10.1148/radiol.2021211027.
9. Kim A. Three segments sampling strategy for the assessment of liver steatosis using magnetic resonance imaging proton density fat fraction / A. Kim, M. Kim, C.M. Lee [et al.] // *Eur J Radiol.* — 2023. — Vol. 159. — P. 110653. — DOI: 10.1016/j.ejrad.2022.110653.
10. Chen G. Optimization of regions of interest sampling strategies for proton density fat-fraction MRI of hepatic steatosis before liver transplantation in ex vivo livers / G. Chen, H. Tang, Y. Yang [et al.] // *Heliyon.* — 2024. — Vol. 10. — P. e40146. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40146.
11. Zerunian M. Updates on quantitative MRI of diffuse liver disease: a narrative review / M. Zerunian, F. Pucciarelli, B. Masci [et al.] // *BioMed Research International.* — 2022. — Vol. 2022. — Art. № 1147111. — DOI: 10.1155/2022/1147111.
12. Noguerol E.C. Quantification of hepatic fat: evaluation of different magnetic resonance imaging measurement strategies in cases of homogeneous and heterogeneous distribution / E.C. Noguerol, L.R.M.F. de Souza, V.F. Muglia [et al.] // *Radiol Bras.* — 2024. — Vol. 57. — P. e20240009en. — DOI: 10.1590/0100-3984.2024.0009-en.
13. Al-Huneidi L.I. Liver fat quantification and steatosis grading in fatty liver disease by magnetic resonance imaging: systematic review and meta-analysis / L.I. Al-Huneidi, F. Zhao, R. Maas [et al.] // *J Gastroenterol Hepatol.* — 2025. — Vol. 40. — P. 2808–2819. — DOI: 10.1111/jgh.70086.



14. Zhang Q.H. Hepatic fat quantification using whole-liver segmentation for assessing the severity of nonalcoholic fatty liver disease: comparison with a region-of-interest sampling method / Q.H. Zhang, Y. Zhao, S.F. Tian [et al.] // *Quant Imaging Med Surg.* — 2021. — Vol. 11. — № 7. — P. 2933–2942. — DOI: 10.21037/qims-20-989.
15. Li Q. Optimal region-of-interest sampling strategy for MRI proton density fat fraction quantification of hepatic steatosis / Q. Li, X. Wang, W. Liu [et al.] // *BMC Med Imaging.* — 2022. — Vol. 22. — P. 111. — DOI: 10.1186/s12880-022-00821-6.
16. Hong C.W. Repeatability and accuracy of various region-of-interest sampling strategies for hepatic MRI proton density fat fraction quantification / C.W. Hong, T. Wolfson, E.Z. Sy [et al.] // *Abdom Radiol (NY).* — 2021. — Vol. 46. — № 7. — P. 3105–3116. — DOI: 10.1007/s00261-021-02965-5.
17. Allen A.M. Multiparametric magnetic resonance imaging for noninvasive assessment of liver disease: variability, sampling effects, and clinical implications / A.M. Allen, V.H. Shah, T.M. Therneau [et al.] // *Hepatology Communications.* — 2020. — Vol. 4. — № 6. — P. 890–903. — DOI: 10.1002/hep4.1508.
18. Syvari J. Longitudinal changes on liver proton density fat fraction differ between liver segments / J. Syvari, D. Junker, L. Patzelt [et al.] // *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery.* — 2021. — Vol. 11. — № 5. — DOI: 10.21037/qims-20-873.
19. Chang Y.C. Automated liver volumetry and hepatic steatosis quantification with magnetic resonance imaging proton density fat fraction / Y.C. Chang, K.C. Yen, P.C. Liang [et al.] // *J Formos Med Assoc.* — 2024. — DOI: 10.1016/j.jfma.2024.04.012.