

МРТ ОЦЕНКА ФРАКЦИИ ЖИРА КОСТНОГО МОЗГА: MDIXON И MDIXON-QUANT

Терещенко Г.В., Кривенцова Н.А., Куприянов Д.А., Новичкова Г.А.

НМИЦ детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева. г. Москва, Россия.

Последовательности МРТ mDixon и mDixon-quant, основанные на химическом сдвиге, чувствительны к содержанию жира и воды в тканях. Если такая специальная последовательность с автоматическим подсчетом фракции жира (FF), как mDixon-quant, недоступна, возможно применение базовой и более общедоступной методики измерения FF по соотношению жира и воды на основе mDixon.

Цель исследования. Оценить сопоставимость и надежность распространенной программы МРТ, предназначенной для широкого практического использования (mDixon) и новой программы с расчетными картами фракции жира (mDixon-quant).

Материалы и методы. В исследование включено 100 пациентов в возрасте младше 18 лет с различными гематологическими заболеваниями: апластическая анемия (64%), хронические миелопролиферативные заболевания (36%). Исследование выполнялось в НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева на томографе Philips Achieva 3.0 Тл с применением последовательностей стандартной mDixon и mDixon-quant с расчетными картами фракции жира. Измерения FF производились в области подвздошных костей и поясничных позвонков.

Результаты. Статистически значимой разницы показатели FF измеренных по соотношению вода-жир на mDixon и на картах FF при mDixon-quant не получено. Помимо этого, оба метода показали сильную корреляцию между собой ($r>0,996$, $p<0,001$), высокую сходимость получаемых данных ($ICC>0,996$).

Заключение. Значения фракции жира, полученные методами mDixon и mDixon-quant сопоставимы, и могут быть применены для оценки костного мозга у педиатрических пациентов с гематологическими заболеваниями.

Ключевые слова: фракция жира, магнитно-резонансная томография, педиатрия, гематология, клеточность.

Контактный автор: Кривенцова Н.А., e-mail: nataliya.krivencova@fccho-moscow.ru

Для цитирования: Терещенко Г.В., Кривенцова Н.А., Куприянов Д.А., Новичкова Г.А. МРТ оценка фракции жира костного мозга: mDixon и mDixon-quant. REJR 2023; 13(4):92-100. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-92-100.

Статья получена: 07.07.23

Статья принята: 07.11.23

MRI OF BONE MARROW FAT FRACTION: DIXON VS DIXON-QUANT

Tereshchenko G.V., Kriventsova N.A., Kuprianov D.A., Novichkova G.A.

Dmitry Rogachev National Medical Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology. Moscow, Russia.

Dixon MRI sequences based on chemical shift are highly sensitive to the fat and water content in the tissue. If special sequence as mDixon-quant is not available then it may be necessary to rely on a basic, and more generally available, method for FF measurement by fat-to-water ratio.

Purpose. To evaluate the comparability and reliability of the commonly used MRI program designed for wide practical use (mDixon) and the new program with fat fraction maps (mDixon-quant).

Materials and methods. The study included 100 patients under 18 years of age with aplastic anemia (64%) and chronic myeloproliferative disorders (36%). The study was carried out at the Dmit-

ry Rogachev haematology, oncology and immunology centre on the Philips Achieva 3.0 T using standard mDixon and mDixon-quant with FF maps. FF measured in the ilium and lumbar vertebrae.

Results. There was no statistically significant difference between FF by the water-to-fat ratio on mDixon and on mDixon-quant FF maps. In addition, both methods showed a strong correlation ($r>0.996$, $p<0.001$), high reliability ($ICC>0.996$).

Conclusion. The mDixon and mDixon-quant fat fraction values are comparable and can be used to evaluate bone marrow in paediatric patients with haematological disorders.

Keywords: acute coronary syndrome, depression, fMRI.

Corresponding author: Kriventsova N.A., e-mail: nataliya.krivencova@fccho-moscow.ru

For citation: Tereshchenko G.V., Kriventsova N.A., Kuprianov D.A., Novichkova G.A. MRI of bone marrow fat fraction: Dixon vs Dixon-quant. REJR 2023; 13(4):92-100. DOI: 10.21569/2222-7415-2023-13-4-92-100.

Received: 07.07.23

Accepted: 07.11.23

Для оценки состояния костного мозга используются многие последовательности, как такие рутинные, как T1-ВИ, диффузионно-взвешенные изображения, так и специализированные последовательности, такие как метод Диксон, спектроскопия [1]. Однако, наиболее эффективным по времени проведения исследования, пространственному разрешению и достоверности получаемых данных остается метод Диксона (mDixon и mDixon-quant), который на основании химического сдвига позволяет разделить воду и жир [2]. Помимо визуальной оценки мягких тканей с подавлением сигнала от жировой такни, метод позволяет оценить количественное соотношение жира и воды в любых структурах организма – фракцию жира (FF, англ. – fat fraction). FF активно применяется на протяжении последних лет для оценки стеатоза печени [3]. Помимо печени FF используется для оценки костного мозга (КМ) при болезни Гоше у взрослых [4], острого лимфобластного лейкоза у детей [5].

Применение МРТ в оценке костного мозга при диагностике гематологических заболеваний у детей позволит врачам-гематологам уменьшить количество инвазивных вмешательств для пациента до необходимого минимума. Метод МРТ оценки костного мозга у детей освящен в литературе скудно, не стандартизован, последовательности для использования не рекомендованы. Если такая специальная последовательность с автоматическим подсчетом фракции жира, как mDixon-quant, недоступна, возможно применение базовой и более общедоступной методики измерения FF по соотношению жира и воды на основе mDixon. Исследова-

ния различных импульсных последовательностей (ИП) важны для внедрения МРТ костного мозга в рутинной практике.

В данной работе оценивается сопоставимость и надежность распространенной программы МРТ, предназначенной для широкого практического использования (mDixon) и новой программы с расчетными картами фракции жира (mDixon-quant) у детей с различными гематологическими заболеваниями.

Материалы и методы.

Пациенты и дизайн исследования.

В исследование вошли 100 пациентов от 1,5 до 18 лет (медиана возраста 11,7 лет) с гистологически подтверждённым гематологическим диагнозом, которые проходили лечение в ФГБУ «НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева» в период с января 2020 года по декабрь 2023 года. Соотношение между девочками и мальчиками (Д:М)=1:1,2 (45 девочек и 55 мальчик). Пациенты были разделены на две группы по основному диагнозу: пациенты с апластической анемией (64%), а также пациенты с хроническими миелопролиферативными заболеваниями (ХМПЗ) (36%). Все пациенты и/или их законные представители подписали письменное согласие на участие в исследовании.

МРТ протокол.

МРТ исследование проводилось на томографе Philips Achieva dStream 3T (Philips Healthcare, Best, the Netherlands) с использованием 32-канальной приемной брюшной катушкой FlexCoverage. МР-протокол включал изображения с использованием последовательностей mDixon и mDixon-quant, выполненные в коронарной плоскости с захватом костей таза и поясничного отдела позво-

ночника. Использованные ИП регистрировались с параметрами: 6 времен эхо (TE) – минимальное TE (TE1) = 1,2 мс, с интервалом (ΔTE) = 0,8 мс; угол опрокидывания (FA) – 3°, для минимизации эффекта влияния T1-взвешенности. Время сканирования: 1 мин 02 с – mDixon-quant, 48 с – mDixon.

Построение карт распределения фракции жира FFquant, полученных на основании последовательности mDixon-quant, осуществлялось автоматически на МРТ консоли с использованием 7 пиковой жировой модели, а также с учетом необходимых поправок на T2* и T1-взвешенность. Для вычисления соотношения вода/жир по методу mDixon зоны интереса помещались в идентичные места на изображение water (рис. 1 А) и fat (рис. 1 Б), а затем подсчитывались по формуле 1.

$$\text{Формула 1: Жир/вода} = \frac{\text{ИС жира}}{\text{ИС жира} + \text{ИС воды}}$$

Зоны интереса (ROI) для измерения фракции жира в костном мозге отмечались в телах подвздошных костей слева и справа (Ilium L, Ilium R), а также в области тел позвонков L4 и L5, избегая области сосудов, кортикального слоя кости, а также зоны возможных артефактов (рис. 1).

Статистический анализ.

Все непрерывные значения представлены как среднее ± стандартное отклонение. Критерий Шапиро-Уилка показал, что распределение значений FF, полученных при подсчете разными методами, имели нор-

мальный закон распределения. Для определения значимости различий между значениями, полученными различными методами (FFquant и FFdixon), был использован параметрический T-критерий Стьюдента. Различия считались значимыми при значении p<0,01, все p-значения были двусторонними.

Для определения корреляции между используемыми показателями применялся корреляционный анализ Пирсона. 95%-ные пределы согласия между двумя измерениями были получены с использованием анализа Бланда-Альтмана.

Коэффициент внутриклассовой корреляции (ICC) использовался для оценки воспроизводимости (сходимости) результатов повторного измерения значений фракции жира через месяц после первого измерения. Значение ICC варьируется от 0 до 1, где 0,01-0,20 – низкое совпадение повторных измерений, 0,21-0,40 – удовлетворительная сходимость, 0,41-0,60 – умеренное согласование, 0,61-0,80 – хорошее согласование, 0,81-1 указывает на замечательное совпадение результатов измерений.

Для выполнения статистической обработки данных использовалась программа Jamovi 1.1.9.0.25 (the jamovi project (2021) (Version 1.6) [Computer Software], <https://www.jamovi.org>), Excel 2016 (Microsoft, США).

Результаты.

Значения FF, полученные методом mDixon-quant и mDixon, измерялись в группе пациентов с апластической анемией (рис. 2)

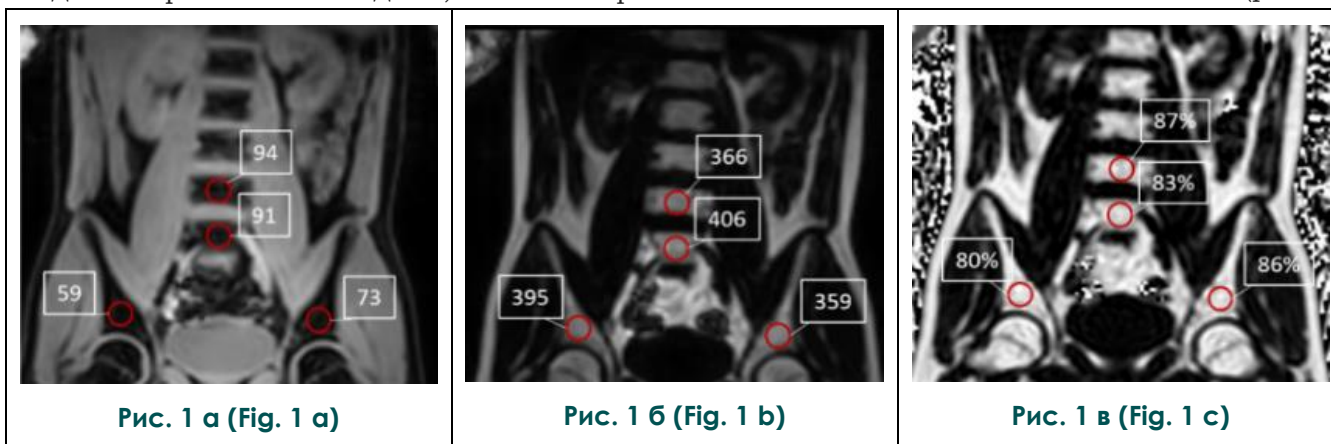


Рис. 1. Пример расположения регионов интереса (ROI) в области подвздошных костей и тел позвонков.

а – Интенсивность МР-сигнала на изображениях water mDixon, б – Интенсивность МР-сигнала на изображениях fat mDixon, в – фракция жира в % на картах FF mDixon-quant.

Fig. 1. An example of the location of regions of interest (ROI) in the iliac bones and vertebral bodies.

а – signal intensity on mDixon water images, б – signal intensity on mDixon fat images, в – fat fraction % on FF mDixon-quant maps.

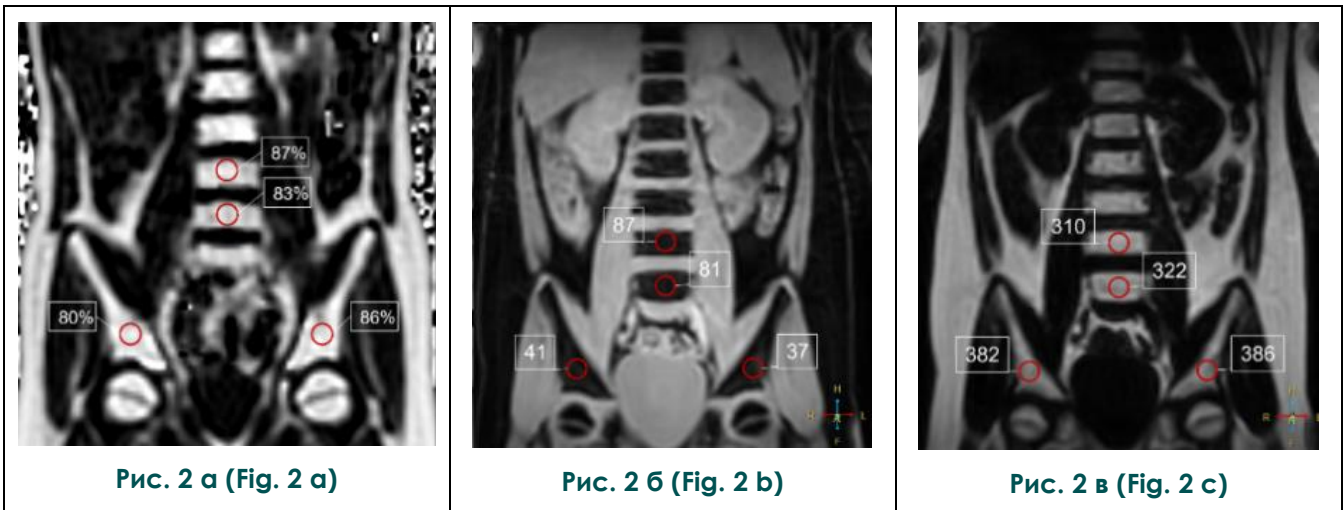


Рис. 2. Показатели костного мозга в различных регионах интереса у пациентов с апластической анемией.

а – значения фракции жира (FFquant) на mDixon-quant FF картах; б – интенсивность МР-сигнала на изображениях water mDixon, в – интенсивность МР-сигнала на изображениях fat mDixon.

Fig. 2. Bone marrow parameters in different ROI in a patient with aplastic anemia.

а – fat fraction (FFquant) on mDixon-quant fat fraction maps, б – signal intensity on mDixon water images, в – signal intensity on mDixon fat images.

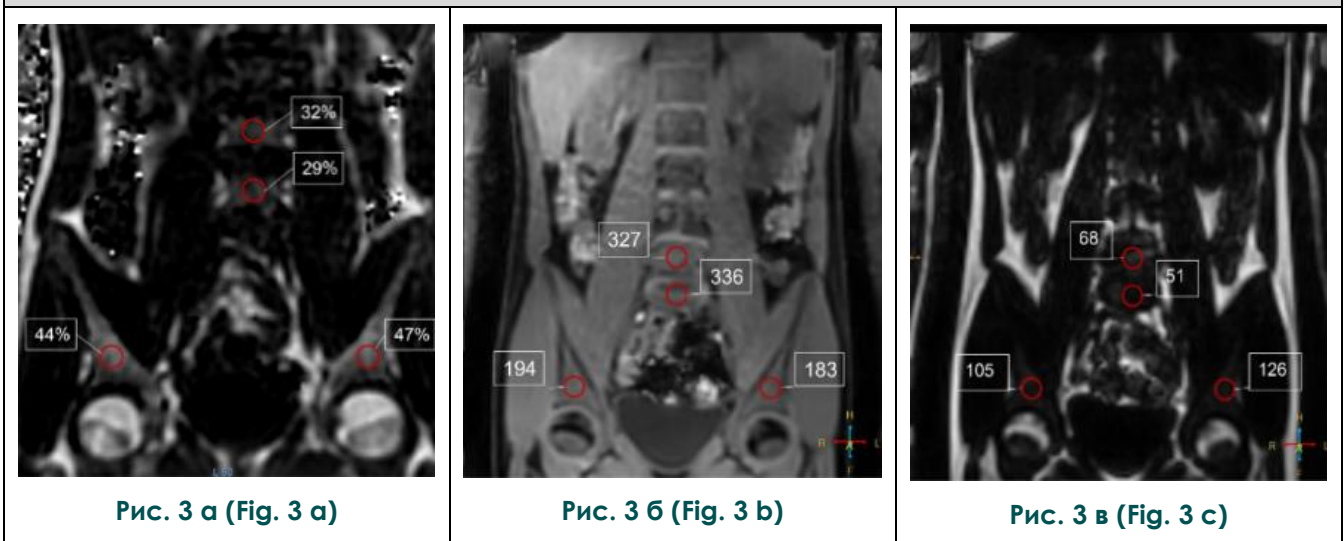


Рис. 3. Показатели костного мозга в различных регионах интереса у пациентов с хроническими миелопролиферативными заболеваниями.

а – значения фракции жира (FFquant) на mDixon-quant FF картах; б – интенсивность МР-сигнала на изображениях water mDixon, в – интенсивность МР-сигнала на изображениях fat mDixon.

Fig. 3. Bone marrow parameters in different ROI in a patient with chronic myeloproliferative disorders.

а – fat fraction (FFquant) on mDixon-quant fat fraction maps, б – signal intensity on mDixon water images, в – signal intensity on mDixon fat images.

и в группе пациентов с ХМПЗ (рис. 3) в идентичных костных структурах с использованием ROI одной площади.

В группе пациентов с апластической анемией средние значения фракции жира на FF mDixon-quant (FFquant) составили: 81,6%±9,66% в теле левой подвздошной кости, 81,8%±9,6% в теле правой подвздошной кости, 79,6%±9,23% в теле позвонка L4, 71,1%±12,7% в теле позвонка L5. Значения показателя вода/жир на ИП mDixon (FFdixon) – 80,1%±9,36%, 72,0%±14,0%, 73,6%±14,2%, 72,8%±14,5% в тех же костных структурах соответственно (рис. 4).

В группе пациентов с ХМПЗ средние значения фракции жира на FF mDixon-quant составили: 34,9%±15,2% в теле левой подвздошной кости, 35,2%±16,1% в теле правой подвздошной кости, 16,2%±11,4% в теле позвонка L4, 17,1%±10,6% в теле позвонка L5. Значения показателя вода/жир на ИП mDixon 35,0%±14,8%, 35,4%±15,6%, 19,0%±9,34%, 18,6%±9,61% в тех же костных структурах соответственно (рис. 5).

Полученные значения фракции жира, измеренные на картах mDixon-quant, и расчетные значения жир/вода попарно сравнивались для каждого ROI при помощи Т-критерия Стьюдента в группе пациентов с апластической анемией (рис. 4) и с ХМПЗ (рис. 5). Статистически значимых различий при сравнении показателей в одной и той же костной структуре (ROI) не выявлено (табл. №1).

Для каждой точки измерения был проверен корреляционный анализ показателей FF для всех пациентов. Для правой подвздошной кости коэффициент корреляции Пирсона составил 0,997, для левой подвздошной кости – 0,998, для тела позвонка L4 – 0,996, для тела позвонка L5 – 0,999, уровень значимости для всех точек составлял <0,001 (рис. 4).

При оценке соответствия FFdixon и FFquant были проанализированы данные 100 пациентов, по четыре точки измерения у каждого, итого 400 измерений. Согласно методу Бланд-Альтмана, смещение показателей

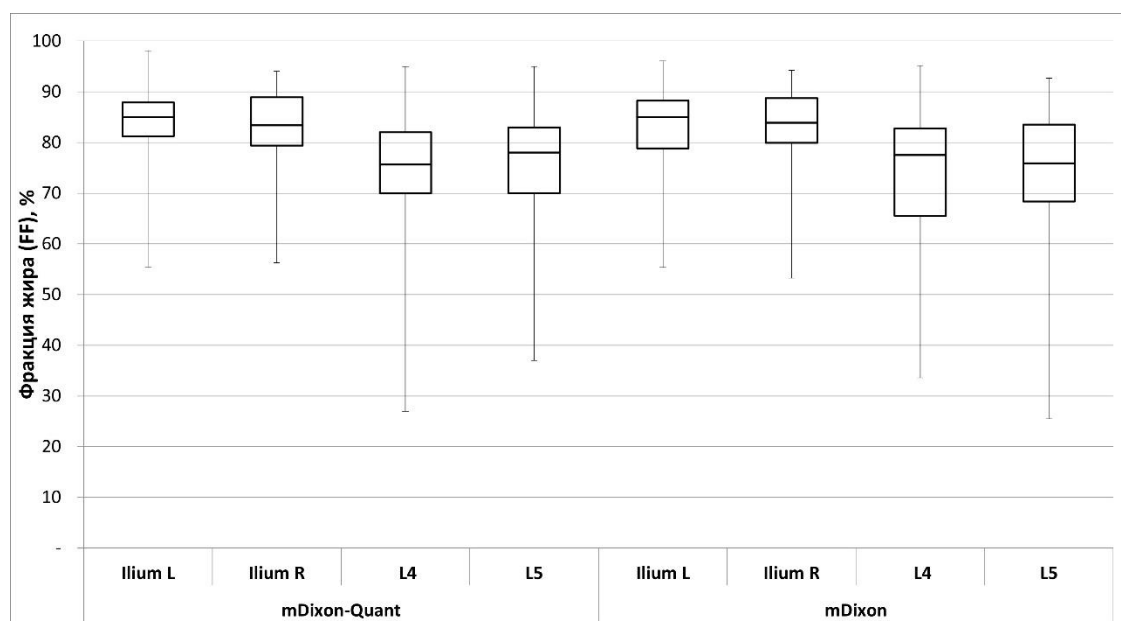


Рис. 4 (Fig. 4)

Рис. 4. Диаграмма размаха значений фракции жира костного мозга (%) в различных ROI, измеренных на mDixon-quant FF картах и по формуле жир/вода на mDixon, в группе пациентов с апластической анемией.

(Ilium L – значения FF в левой подвздошной, Ilium R – значения FF в правой подвздошной, L4 – значения FF в 4 поясничном позвонке, L5 – значения FF в 5 поясничном позвонке).

Fig. 4. Box Plot of the bone marrow fat fraction (%) in different ROI on mDixon-quant FF maps and mDixon fat-to-water ratio in patients with aplastic anemia.

(Ilium L – FF values in the left iliac bone, Ilium R – FF values in the right iliac bone, L4 – FF values in the 4 lumbar, L5 - FF values in the 5 lumbar vertebra).

фракции жира между двумя методами составили 0,587, границы предела соответствия – от -4,685 до 5,858 (рис. 5).

Наибольшие расхождения между двумя методами встречаются в пограничных областях значений – вблизи 0% и приближаясь к 100%. FF, получаемые по методике mDixon, в области близкой к нулю завышает получаемые значения, в то время как в областях близких к 100% метод в несколько занижает получаемый результат. Однако среднее смещение параметров составляет около 0,6%, что говорит о высоком соответствии двух методик измерения фракции жира.

Помимо этого, для выявления сопоставимости полученных данных был подсчитан ICC, за «золотой стандарт» был выбран метод mDixon-quant, отдельно для подвздошных костей и позвонков, который составил 0,996 и 0,994 соответственно, что говорит о высокой сходимости измерений при различных методах измерения ФЖ костного мозга.

Обсуждение.

Полученные нами показатели фракции

жира костного мозга совпадают с данными, опубликованными другой исследовательской группой, изучавшей взрослых пациентов с апластической анемией и миелопролиферативными заболеваниями [6].

В данной работе получены значения фракции жира костного мозга при помощи методов Диксона: mDixon-quant и mDixon. Наиболее важно обращать внимание на количество времен эхо (TE) и угол опрокидывания в данных последовательностях. Исследования печени и мышц показали, что наиболее эффективными являются последовательности Диксон с шестью и более временами эхо, а не последовательности с 2TE и 3TE [7]. Reeder и соавт. описывают необходимость как минимум 6 времен эхо для оптимального разделения воды и жира с коррекцией на T2*ВИ [8]. Именно этим обусловлено количество времен эхо, встроенное в mDixon-quant [9], а также именно поэтому в нашей работе выбраны 6TE для mDixon.

Только единичные работы обращают внимание на различные методики измерения

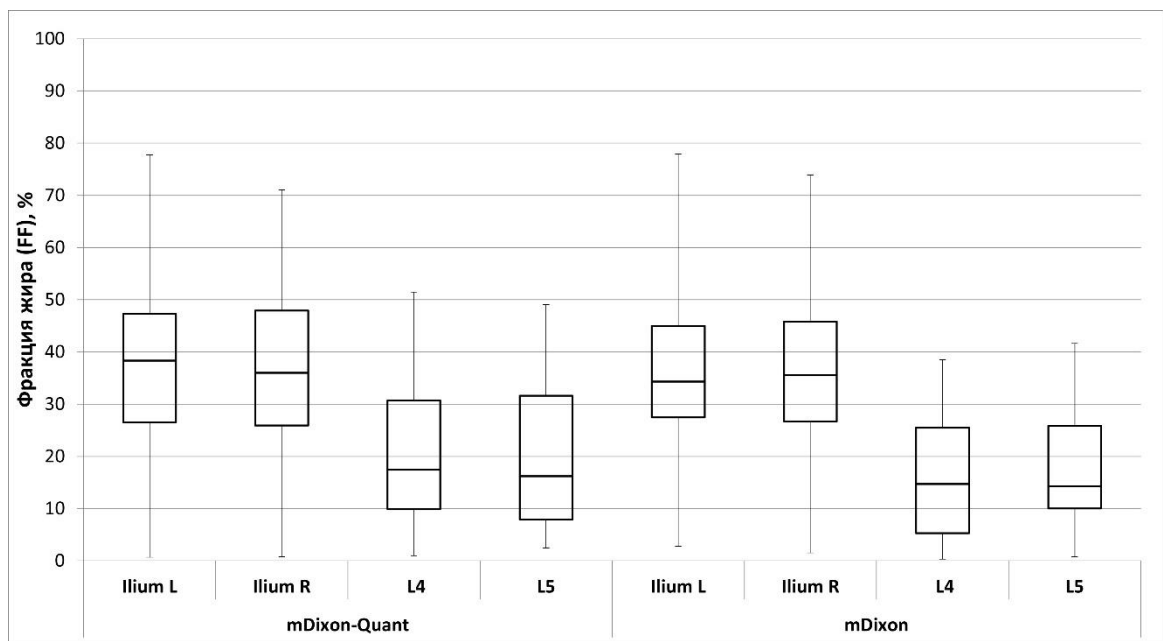


Рис. 5 (Fig. 5)

Рис. 5. Диаграмма размаха значений фракции жира костного мозга (%) в различных ROI, измеренных на mDixon-quant FF картах и по формуле жир/вода на mDixon, в группе пациентов с хроническими миелопролиферативными заболеваниями.

(Ilium L – значения FF в левой подвздошной кости, Ilium R – значения FF в правой подвздошной кости, L4 – значения FF в 4 поясничном позвонке, L5 – значения FF в 5 поясничном позвонке).

Fig. 5. Box Plot of the bone marrow fat fraction (%) in different ROI on mDixon-quant FF maps and mDixon fat-to-water ratio in patients with chronic myeloproliferative disorders.

(Ilium L – FF values in the left iliac bone, Ilium R – FF values in the right iliac bone, L4 – FF values in the 4 lumbar, L5 – FF values in the 5 lumbar vertebra).

Таблица №1. Значения p-value Т-критерия Стьюдента при сравнении показателей FF, измеренные на mDixon-quant FF картах и по формуле жир/вода на mDixon, в различных регионах интереса для разных групп пациентов.

ROI	Апластическая анемия (Aplastic anemia)	ХМПЗ (Chronic myeloproliferative disorders)
Левая подвздошная кость (Ilium L)	p=0,499	p=0,467
Правая подвздошная кость (Ilium R)	p=0,418	p=0,437
Позвонок L4 (Vert L4)	p=0,356	p=0,417
Позвонок L5 (Vert L5)	p=0,327	p=0,398

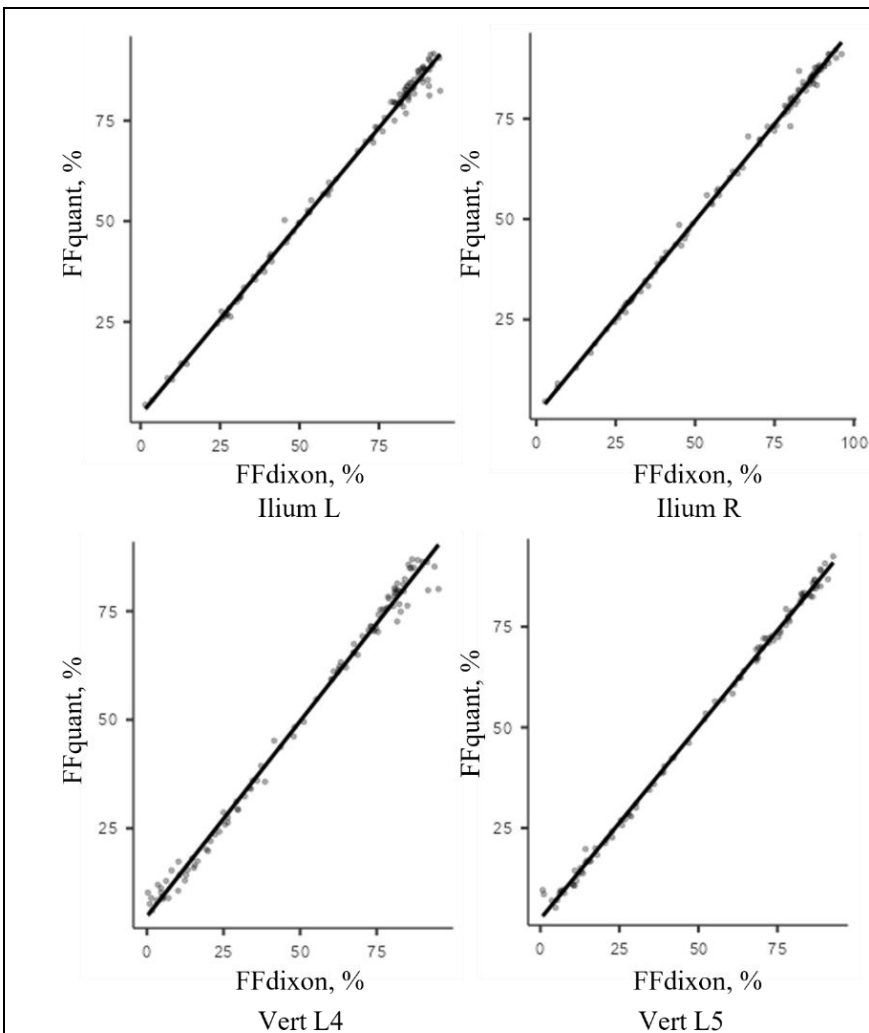


Рис. 6 (Fig. 6)

Рис. 6. Корреляционные кривые значений фракции жира, измеренные разными методами.

(FFquant – показатель фракции жира на картах FF mDixon-quant, FFdixon – расчетное значение жира/вода по интенсивности сигнала на последовательности mDixon), Ilium L – значения FF в левой подвздошной кости, Ilium R – значения FF в правой подвздошной кости, Vert L4 – значения FF в 4 поясничном позвонке, Vert L5 – значения FF в 5 поясничном позвонке).

Fig. 6. Correlation curves for FF.

(FFquant - fat fraction on mDixon-quant fat fraction maps, FFdixon – fat-to-water ratio on mDixon, Ilium L - FF values in the left iliac bone, Ilium R – FF values in the right iliac bone, L4 – FF values in the 4 lumbar, L5 – FF values in the 5 lumbar vertebra).

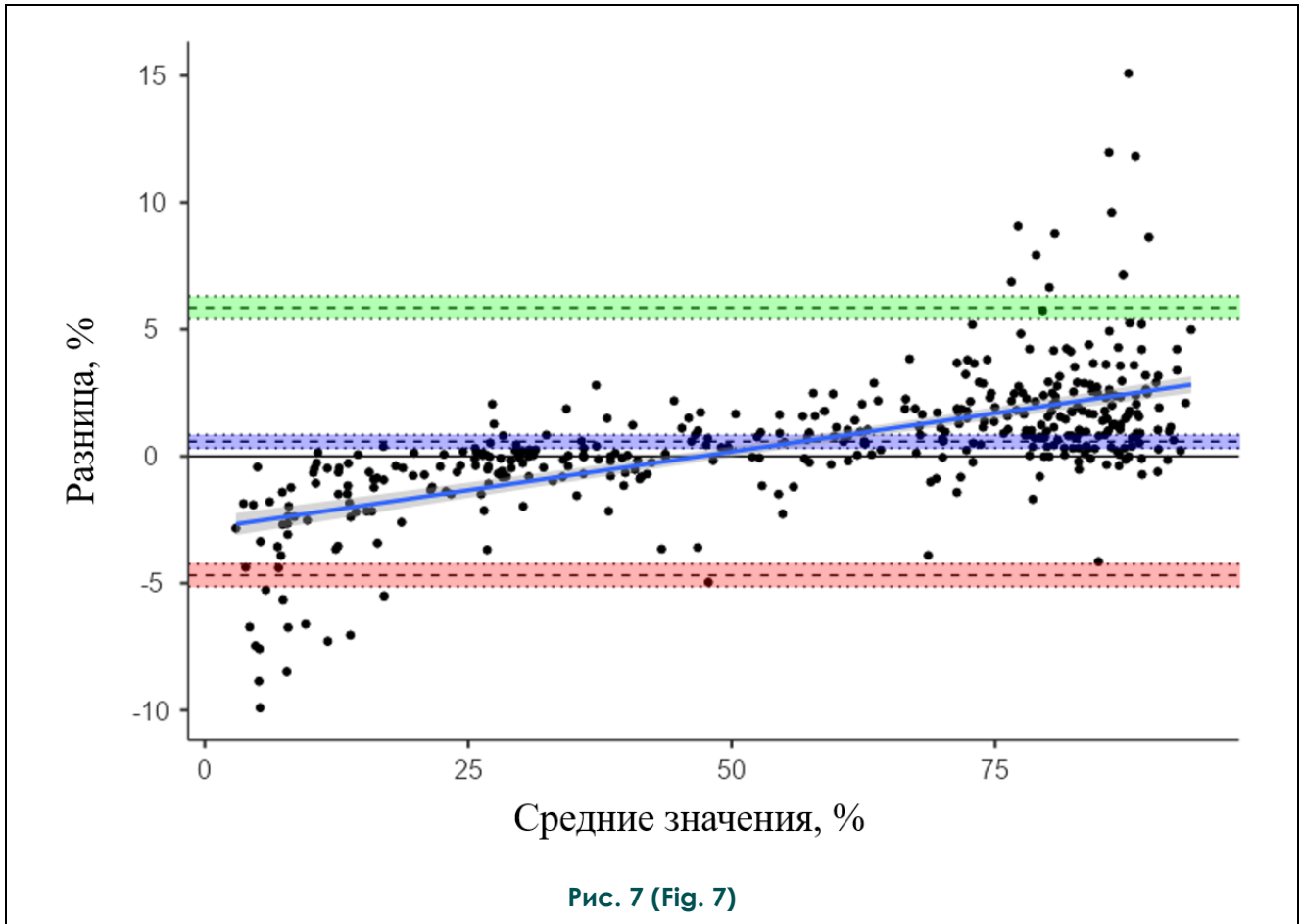


Рис. 7 (Fig. 7)

Рис. 7. График оценки сопоставления двух количественных методов по методике Бланд-Альтмана.

Fig. 7. Bland-Altman Comparison Evaluation Graph.

жира. В исследовании А. Bainbridge и соавторов проводилось сканирование КМ на томографах разных производителей (Philips, GE, Siemens) с использованием последовательностей с различным количеством времен эхо (2ТЕ, 3ТЕ, 6ТЕ) [10]. По полученным данным, как и в нашем исследовании, была получена сильная корреляция между различными последовательностями. Было показано, что такие специализированные последовательности подсчета фракции жира, как mDixon-quant, наиболее эффективны, однако, если подобных последовательностей нет, то можно использовать базовые и более доступные методы, основанные на методе Диксон с наибольшей погрешностью в 10%. Эти данные также сопоставимы с нашими, в нашем исследовании интервал согласованности между двумя измерениями составил 10,54% [10]. Средние значения ФЖ в каждой группе пациентов отличались более чем на 10%, что позволяет использовать метод

mDixon с последующим подсчетом FF как альтернативу mDixon-quant.

Ограничением данной работы является детский возраст пациентов, в дальнейшем возможно расширение выборки исследуемой популяции на молодых взрослых. Помимо этого, при возможности, желательно проводить предварительную калибровку последовательностей на фантомах с известным содержанием жира для более точной оценки фракции жира.

Заключение.

Значения фракции жира, полученные методами mDixon и mDixon-quant сопоставимы, и могут быть применены для оценки костного мозга у педиатрических пациентов с гематологическими заболеваниями.

Источник финансирования и конфликт интересов.

Статья финансировалась в рамках гранта Российского научного фонда №22-25-00553 «Новые МРТ технологии в исследова-

нии тканевых характеристик костного мозга при апластической анемии: возможности контроля эффективности терапии и сравнение с результатами гистопатоморфологии».

Список литературы:

1. Karampinos, D. C.; Ruschke, S.; Dieckmeyer, M.; Diefenbach, M.; Franz, D.; Gersing, A. S.; et al. Quantitative MRI and spectroscopy of bone marrow. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2018; 47 (2): 332–353.
2. Donners, R.; Obmann, M. M.; Boll, D.; Gutzeit, A.; Harder, D. Dixon or DWI – Comparing the utility of fat fraction and apparent diffusion coefficient to distinguish between malignant and acute osteoporotic vertebral fractures. *Eur. J. Radiol.* 2020; Elsevier Ireland Ltd 132.
3. Колобанова, Е. С.; Сергеева, О. Н.; Шориков, М. А.; Лаптева, М. Г.; Францев, Д. Ю.; Долгушин, Б. И. Множественный мелкоочаговый перипортальный стеатоз при статинном гепатите, мимикрирующий метастазы в печени. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2018; 8 (4): 282–292.
4. Медеников, А. А.; Вышедкевич, Е. Д.; Штенцель, Р. Э.; Ефимцев, А. Ю.; Мащенко, И. А.; Безрукых, В. А.; et al. Методы лучевой диагностики в выявлении висцеральных и костно-суставных изменений при болезни Гоше I типа и оценке эффективности лечения. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2021; 11 (2): 46–67.
5. Кривенцова, Н. А.; Куприянов, Д. А.; Меньшиков, П. Е.; Терещенко, Г. В. МР-биомаркер изменений костного мозга у детей с острым лимфобластным лейкозом. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2020; 10 (4): 159–168.

References:

1. Karampinos, D. C.; Ruschke, S.; Dieckmeyer, M.; Diefenbach, M.; Franz, D.; Gersing, A. S.; et al. Quantitative MRI and spectroscopy of bone marrow. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2018; 47 (2): 332–353.
2. Donners, R.; Obmann, M. M.; Boll, D.; Gutzeit, A.; Harder, D. Dixon or DWI – Comparing the utility of fat fraction and apparent diffusion coefficient to distinguish between malignant and acute osteoporotic vertebral fractures. *Eur. J. Radiol.* 2020; Elsevier Ireland Ltd 132.
3. Kolobanova, E. S.; Sergeeva, O. N.; Shorikov, M. A.; Lapteva, M. G.; Frantsev, D. Yu.; Dolgushin, B. I. Multiple small-focal periportal steatosis in statin hepatitis, mimicking metastases in the liver. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2018; 8 (4): 282–292 (in Russian).
4. Medenikov, A. A.; Vyshedkevich, E. D.; Stenzel, R. E.; Efimtsev, A. Yu.; Mashchenko, I. A.; Bezrukikh, V. A.; et al. Radiation diagnostic methods in identifying visceral and osteoarticular changes in type I Gaucher disease and assessing the effectiveness of treatment. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2021; 11 (2): 46–67 (in Russian).
5. Kriventsova, N. A.; Kupriyanov, D. A.; Menshikov, P. E.; Tereshchenko, G.V. MRI biomarker of bone marrow changes in children with acute lymphoblastic leukemia. *Russ. Electron. J. Radiol.* 2020; 10 (4): 159–168.6.

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о которых необходимо сообщить.

6. Zeng, Z.; Ma, X.; Guo, Y.; Ye, B.; Xu, M.; Wang, W. Quantifying Bone Marrow Fat Fraction and Iron by MRI for Distinguishing Aplastic Anemia from Myelodysplastic Syndromes. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2021; 54 (6): 1754–1760.
7. Grimm, A.; Meyer, H.; Nickel, M. D.; Nittka, M.; Raithel, E.; Chaudry, O.; et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification. *Eur. J. Radiol.* 2018; 103: 57–64.
8. Reeder, S. B.; Robson, P. M.; Yu, H.; Shimakawa, A.; Hines, C. D. G.; McKenzie, C. A.; et al. Quantification of hepatic steatosis with MRI: the effects of accurate fat spectral modeling. *J. Magn. Reson. Imaging JMRI.* 2009; 29 (6): 1332–1339.
9. Lee, S. H.; Yoo, H. J.; Yu, S. M.; Hong, S. H.; Choi, J. Y.; Chae, H. D. Fat quantification in the vertebral body: Comparison of modified dixon technique with single-voxel magnetic resonance spectroscopy. *Korean J. Radiol.* 2019; *Korean Radiological Society* 20 (1): 126–133.
10. Bainbridge, A.; Bray, T. J. P.; Sengupta, R.; Hall-Craggs, M. A. Practical Approaches to Bone Marrow Fat Fraction Quantification Across Magnetic Resonance Imaging Platforms. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2020; 52 (1): 298–306.
- X.; Guo, Y.; Ye, B.; Xu, M.; Wang, W. Quantifying Bone Marrow Fat Fraction and Iron by MRI for Distinguishing Aplastic Anemia from Myelodysplastic Syndromes. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2021; 54 (6): 1754–1760 (in Russian).
7. Grimm, A.; Meyer, H.; Nickel, M. D.; Nittka, M.; Raithel, E.; Chaudry, O.; et al. Evaluation of 2-point, 3-point, and 6-point Dixon magnetic resonance imaging with flexible echo timing for muscle fat quantification. *Eur. J. Radiol.* 2018; 103: 57–64.
8. Reeder, S. B.; Robson, P. M.; Yu, H.; Shimakawa, A.; Hines, C. D. G.; McKenzie, C. A.; et al. Quantification of hepatic steatosis with MRI: the effects of accurate fat spectral modeling. *J. Magn. Reson. Imaging JMRI.* 2009; 29 (6): 1332–1339.
9. Lee, S. H.; Yoo, H. J.; Yu, S. M.; Hong, S. H.; Choi, J. Y.; Chae, H. D. Fat quantification in the vertebral body: Comparison of modified dixon technique with single-voxel magnetic resonance spectroscopy. *Korean J. Radiol.* 2019; *Korean Radiological Society* 20 (1): 126–133.
10. Bainbridge, A.; Bray, T. J. P.; Sengupta, R.; Hall-Craggs, M. A. Practical Approaches to Bone Marrow Fat Fraction Quantification Across Magnetic Resonance Imaging Platforms. *J. Magn. Reson. Imaging.* 2020; 52 (1): 298–306.