

DOI: <https://doi.org/10.17650/1818-8346-2025-20-1-65-72>



Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография как альтернатива позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой у пациентов с лимфомами. Обзор литературы и клинические наблюдения

С.А. Алексеев, В.Н. Троян, О.А. Рукавицын, А.А. Трефилов

ФГБУ «Главный военный клинический госпиталь им. акад. Н.Н. Бурденко» Минобороны России; Россия, 105094 Москва, Госпитальная пл., 3

Контакты: Сергей Анатольевич Алексеев alxvsrge@gmail.com

Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография может стать альтернативой традиционным методам, таким как компьютерная томография и позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой.

В статье проанализированы не только преимущества метода, но и недостатки и «подводные камни», с которыми приходится сталкиваться врачу-диагносту. Представлены данные собственных исследований о применении диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела у пациентов с лимфомами.

Ключевые слова: диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография, компьютерная томография, фтордезоксиглюкоза, неходжкинская лимфома, позитронно-эмиссионная томография, измеряемый коэффициент диффузии

Для цитирования: Алексеев С.А., Троян В.Н., Рукавицын О.А., Трефилов А.А. Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография как альтернатива позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, с ^{18}F -фтордезоксиглюкозой у пациентов с лимфомами. Обзор литературы и клинические наблюдения. Онкогематология 2025;20(1):65–72.

DOI: <https://doi.org/10.17650/1818-8346-2025-20-1-65-72>

Diffusion-weighted magnetic resonance imaging as an alternative to positron emission tomography combined with computed tomography with ^{18}F -fluorodeoxyglucose in patients with lymphomas: a literature review and clinical observations

S.A. Alekseev, V.N. Troyan, O.A. Rukavitsyn, A.A. Trefilov

Main Military Clinical Hospital named after academician N.N. Burdenko, Ministry of Defense of Russia; 3 Gospital'naya Ploshchad', Moscow 105094, Russia

Contacts: Sergey Anatolievich Alekseev alxvsrge@gmail.com

Diffusion-weighted magnetic resonance imaging may provide an alternative to traditional methods such as computed tomography and positron emission tomography/computed tomography with ^{18}F -fluorodeoxyglucose.

The article analyzes not only the advantages of the method, but also the disadvantages and pitfalls that a diagnostician has to face. Data from own studies on the use of whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging in patients with lymphomas are presented.

Keywords: diffusion-weighted magnetic resonance imaging, computed tomography, fluorodeoxyglucose, non-Hodgkin's lymphoma, positron emission tomography, measured diffusion coefficient

For citation: Alekseev S.A., Troyan V.N., Rukavitsyn O.A., Trefilov A.A. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging as an alternative to positron emission tomography combined with computed tomography with ^{18}F -fluorodeoxyglucose in patients with lymphomas: a literature review and clinical observations. *Onkogematologiya = Oncohematology* 2025;20(1):65–72. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.17650/1818-8346-2025-20-1-65-72>

Введение

Анализ возможностей применения диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии (ДВ МРТ) и других методов лучевой диагностики у пациентов с неходжкинскими лимфомами для оценки лечения и выявления рецидива заболевания весьма актуален.

Обзор литературы

Мы провели поиск публикаций в базе данных PubMed по запросу, содержащему ключевые слова: DWI, MRI, diffusion weighted, lymphoma, lymphoproliferative disorder. Получена 121 публикация.

В отечественной базе Российского индекса научного цитирования по поисковому запросу «диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография», «ДВ МРТ», «лимфома», «лимфопролиферативное заболевание» обнаружена 51 публикация.

Всего из полученных публикаций вручную отобрали 35 релевантных статей.

Среди злокачественных опухолей системы крови лимфопролиферативные заболевания составляют приблизительно 5–6 %. Наибольшую часть, >2/3 всех лимфом, представляют неходжкинские лимфомы, остальная часть — лимфома Ходжкина [1, 2].

Неходжкинские лимфомы — биологически гетерогенная группа злокачественных лимфопролиферативных заболеваний с варибельным клиническим течением и прогнозом [3]. Один из основных факторов, влияющих на дальнейший выбор тактики лечения и прогноза заболевания, — определение его распространенности с помощью лучевой диагностики. Кроме того, методы лучевой диагностики являются неотъемлемой частью планирования лучевой терапии и мониторинга оценки ответа на лечение у таких пациентов [3–5].

Система определения стадии лимфопролиферативных заболеваний Ann Arbor, модифицированная Costwold, используется во всем мире. Данная система базируется на выявлении локализации пораженных лимфатических узлов, а также на возможных клинических проявлениях [6].

Для установления стадии заболевания активно используются такие методы лучевой диагностики, как компьютерная томография (КТ) или позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с компьютерной томографией (ПЭТ/КТ), с применением ^{18}F -фтордезоксиглюкозы (^{18}F -ФДГ), причем наибольшую популярность благодаря своей эффективности приобрела последняя [7, 8]. Кроме того, разработана и активно используется для ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ шкала оценки

ответа на лечение ходжкинской и неходжкинских лимфом — PET-scale [8].

Как и любой из известных и применяемых специалистами лучевой диагностики методов, ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ имеет ряд недостатков. Прежде всего, это лучевая нагрузка, получаемая пациентами во время исследования, особенно детьми и подростками. Данные D. Brenner и соавт. и J.D. Mathews и соавт. показали, что избыточная лучевая нагрузка у пациентов детского и подросткового возраста может приводить к повышенному риску развития других злокачественных заболеваний в течение жизни [9, 10].

Другим недостатком, по некоторым данным, является то, что чувствительность и специфичность метода варьируют в зависимости от гистологического подтипа лимфомы. G. Jerusalem и соавт. на примере 42 пациентов показали, что ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ имеет наиболее высокие показатели чувствительности и специфичности у пациентов с фолликулярной лимфомой низкой степени злокачественности по сравнению с другими подтипами лимфомы [11].

Также, несомненно, имеют значение доступность и распространенность метода и его экономическая составляющая. В настоящее время в России в городах с населением >500 тыс. человек размещены около 60 ПЭТ-центров. Примерно 30 из них находятся в Москве, Санкт-Петербурге, Московской и Ленинградской областях, население которых суммарно составляет около 30 млн человек. По данным экспертов, <20 % населения нашей страны обеспечены 1 ПЭТ-центром на 1 млн человек, а в остальных регионах (около 129 млн человек) оснащение составляет всего 1 центр на 4 млн населения. По данным Федерального фонда обязательного медицинского страхования, в территориальной программе госгарантий в 37 регионах на 2023 г. не установлены амбулаторные тарифы на проведение диагностических ПЭТ/КТ-исследований. В частности, тарифы на оплату таких исследований отсутствовали в Смоленской, Калининградской, Мурманской, Иркутской, Омской, Вологодской, Волгоградской и Нижегородской областях, Забайкальском крае, республиках Крым, Карелия, Коми, Тыва, Марий Эл, Дагестан, Ингушетия. Для проведения исследования пациенты вынуждены обращаться в учреждения других городов, располагающих аппаратами ПЭТ/КТ.

С учетом изложенного актуальными являются поиск и внедрение в рутинную практику альтернативного метода лучевой диагностики, лишенного недостатков и обладающего достоинствами ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ. Таким методом может стать ДВ МРТ.

Данный метод магнитно-резонансной томографии основан на выявлении и оценке движения молекул воды. Это движение в биологических тканях происходит во внутриклеточном, внеклеточном пространстве и трансмембранно. В биологических тканях диффузия не является случайной, поскольку ткани структурированы. Клеточные мембраны, сосудистые структуры, аксональные цилиндры ограничивают диффузию. Таким образом, биологические ткани разделены на отсеки. Кроме того, химическое взаимодействие молекул воды и макромолекул влияет на процесс диффузии [12].

При наличии у пациента лимфопролиферативного заболевания броуновское движение молекул воды в опухолевой ткани ограничено из-за большого количества опухолевых клеток, что приводит к повышению интенсивности сигнала от них на ДВ МРТ по сравнению с неизмененными тканями [13, 14].

Используя этот принцип, с помощью ДВ МРТ можно обнаруживать изменения, связанные с опухолевым процессом, которые не ограничиваются анатомической информацией, например вовлечение костного мозга в заболевание [15].

Важную роль в оценке и интерпретации исследования ДВ МРТ играет измеряемый коэффициент диффузии (ИКД). Данные С. Lin и соавт. при сравнении методов ДВ МРТ и ПЭТ/КТ до учета изменений параметра ИКД, но с использованием критерия размера очага поражения показали чувствительность и специфичность ДВ МРТ 90 и 94 % соответственно. Последующие дополнительные визуальный анализ и измерение ИКД снизили чувствительность до 81 %, при этом повысив специфичность до 100 % [16].

O. Dudeck и соавт. показали, что вычисление ИКД при ДВ МРТ может предоставить полезные сведения об ответе на лечение и уникальную прогностическую информацию об эффективности терапии [17].

В исследовании С. Lin и соавт. показано, что среднее значение ИКД ($\times 10^{-3}$ мм²/с) в областях с ограниченной диффузией составило 0,75 по сравнению с 1,6 в областях без ограничений. В работе X. Wu и соавт. ИКД обратно коррелировал с максимальным стандартизованным значением накопления ¹⁸F-ФДГ, что позволяет предположить сопоставимость этих параметров [18].

Диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография в сравнении с ПЭТ/КТ и КТ имеет ряд несомненных преимуществ, таких как отсутствие лучевой нагрузки на пациента, необходимости использования рентгеноконтрастных веществ, доступность и низкая стоимость [19, 20].

Несмотря на перечисленные преимущества, в ходе обзора обнаружены противоречивые данные о высоких показателях эффективности метода по сравнению с ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ. Например, в работах С. Lin и соавт., V. Stéphane и соавт. чувствительность ДВ МРТ составила 93 и 100 % соответственно [16, 21]. При этом результаты работ H.M. van Ufford и соавт., а также X. Wu

и соавт. кардинально отличались и показали чувствительность всего 59 и 63 % соответственно [18, 22].

Также стоит обратить внимание на «подводные камни», с которыми приходится встречаться врачу-диагносту при использовании и интерпретации результатов ДВ МРТ.

Прежде всего, это визуальные изменения, присущие данному методу, которые могут привести к ложноположительным результатам: например, ограниченная способность различать злокачественные и доброкачественные причины увеличения лимфатических узлов, особенно паховых и подмышечных, а также высокая чувствительность к малым лимфатическим узлам с повышенным сигналом. Так, в работе A.R. Padhani и соавт. при сравнении результатов ДВ МРТ и ПЭТ/КТ с ¹⁸F-ФДГ у 17 пациентов с впервые выявленным и подтвержденным диагнозом злокачественной лимфомы, несмотря на общее увеличение числа истинно положительных результатов и уменьшение ложноотрицательных, отмечено увеличение частоты ложноотрицательных результатов вдвое — с 3 до 6 % [23].

Кроме того, на оценку и интерпретацию результатов исследования могут влиять анатомические и функциональные особенности [18–24]. Например, D. Le Bihan и соавт. и K. Nasu и соавт. высказывают мнение, что сердечные сокращения вызывают артефакты в средостении и верхнем этаже брюшной полости, потому что ДВ МРТ чувствительна к движению. Эти артефакты могут привести к неправильной оценке и измерению ИКД в лимфатических узлах этой области и в печени [24, 25].

Y. Chen и соавт. подчеркивают, что при первичном стадировании лимфомы с помощью ДВ МРТ не всегда удастся выявить очаги поражения, расположенные близко к сердцу, поэтому дополнительные стандартные магнитно-резонансные (МР) последовательности тоже играют важную роль в оценке распространенности заболевания [19]. D.M. Koh и соавт. утверждают, что после терапии опухолям больших размеров зачастую требуется длительное время, прежде чем они покажут значимое изменение размеров. Следовательно, для оценки ответа на лечение только морфологической и размерной оценки может быть недостаточно, а функциональные изменения, выявляемые с помощью ДВ МРТ, могут быть полезны. Также при анализе результатов ДВ МРТ, выполненных во время терапии пациента, важно учитывать возможные завышенные значения ИКД, обусловленные сердечными сокращениями и дыхательными движениями, которые могут привести к ложноположительным результатам [26].

Что касается экстранодального поражения лимфомой, особый интерес вызывает селезенка и ее вовлечение в процесс, поскольку она имеет физиологически повышенный сигнал на изображениях ДВ МРТ, следовательно, объективная оценка ее потенциального вовлечения в заболевание может быть затруднена.

С. Lin и соавт., проанализировав результаты ДВ МРТ 15 пациентов, пришли к выводу, что при оценке поражения селезенки необходимо учитывать и использовать другие МР-последовательности [16].

Другие органы и структуры, такие как надпочечники, слюнные железы, яичники, яички, предстательная железа, почки, стенки желудка и эндометрий, на изображениях ДВ МРТ также имеют повышенный сигнал, что может привести к получению ложноположительных результатов оценки данных исследования [26, 27].

Особое место при оценке распространенности заболевания занимает костный мозг. ДВ МРТ играет неотъемлемую роль в обнаружении и характеристике поражений костного мозга, планировании биопсии или хирургического вмешательства, а также последующем наблюдении после лечения [28, 29].

Для оценки результатов ДВ МРТ костного мозга необходимо знать его нормальный состав, распределение, изменения, которые происходят с возрастом, а также факторы, влияющие на эти изменения. Например, красный костный мозг имеет неоднородный сигнал на разных последовательностях ДВ МРТ, что необходимо учитывать во избежание ошибочной интерпретации результатов [30].

Как утверждают D. Ballon и соавт., A.R. Padhani и соавт., у пациентов с лимфомой терапия может вызывать изменения интенсивности сигнала костного мозга на изображениях с ДВ МРТ: в процессе химиотерапии интенсивность сигнала снижается, а использование во время лечения факторов роста стимулирует костный мозг, что приводит к увеличению интенсивности сигнала [4, 23, 31, 32].

Ошибки интерпретации изменений костного мозга также могут быть вызваны наличием доброкачественных образований, гемангиомами или, например, остеонекротическими изменениями [32–34].

При наличии возможных остеонекротических изменений врачи лучевой диагностики должны понимать и учитывать, что это может быть обусловлено возможным осложнением, вызванным особенностями лечения, например использованием кортикостероидов или трансплантацией стволовых клеток [35–37].

Далее представлены клинические примеры практического применения ДВ МРТ у пациентов с лимфомами в условиях Главного военного клинического госпиталя им. Н.Н. Бурденко.

Клинический случай 1

Пациенту К., 20 лет, с диагнозом лимфомы Ходжкина выполнены ПЭТ/КТ-исследование, а также ДВ МРТ всего тела, по результатам которых выявлены множественные увеличенные лимфатические узлы шеи, средостения и брюшной полости. При сравнении результатов исследования на изображениях ДВ МРТ отчетливо прослеживается повышенный физиологический МР-сигнал от вещества кости, тазовых и паховых лим-

фатических узлов, селезенки, что может быть ошибочно расценено как поражение лимфомой (рис. 1).

Пациенту установлен диагноз: лимфома Ходжкина, нодулярный склероз 2-го типа, IVA стадия, с поражением легких, селезенки, лимфатических узлов средостения, шейных, надключичных, ворот печени (международный прогностический индекс — 3 (июнь 2023 г.)). С июля по октябрь 2023 г. проведены 4 цикла химиотерапии по программе BEACOPP esc.

При сравнении применяемых диагностических методов точность ДВ МРТ в выявлении всех патологических очагов составила 100 %, несмотря на наличие таких очагов в легких, поскольку зачастую выявление экстранодальных легочных очагов может вызывать затруднение, обусловленное артефактами от дыхания.

Несмотря на выявленные в ходе обзора данные об ограничении возможности визуализации лимфатических узлов в околосердечной области, у данного пациента все патологически измененные лимфатические узлы в средостении были четко дифференцированы на основании не только изменения сигнала, но и в результате измерения размеров.

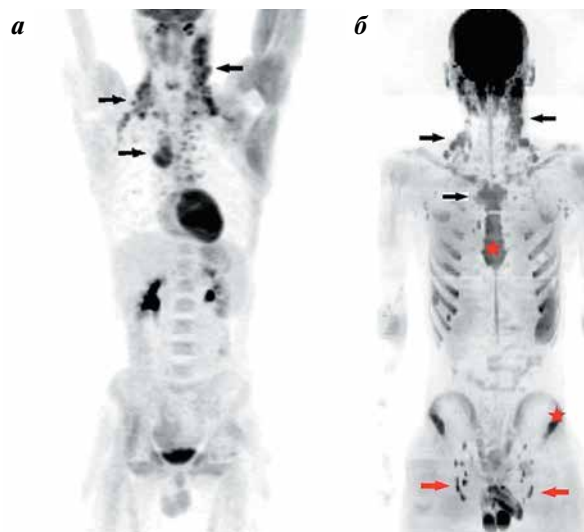


Рис. 1. Данные первичного обследования пациента: а — результаты позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, всего тела (3D-реконструкция). Метаболически активные шейные, средостенные лимфатические узлы (стрелки); б — результаты диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела (3D-реконструкция). Патологически измененные шейные, средостенные лимфатические узлы (черные стрелки); тазовые и паховые лимфатические узлы с физиологическим повышенным магнитно-резонансным сигналом (красные стрелки); физиологический повышенный магнитно-резонансный сигнал от вещества кости (красные звездочки); повышенный физиологический сигнал от селезенки

Fig. 1. Initial examination data: a — whole-body positron emission tomography combined with computed tomography (3D reconstruction): metabolically active cervical, mediastinal lymph nodes (arrows); b — diffusion-weighted magnetic resonance imaging of the whole body (3D reconstruction): pathologically changed cervical, mediastinal lymph nodes (black arrows); pelvic and inguinal lymph nodes with physiologically increased magnetic resonance signal (red arrows); physiologically increased magnetic resonance signal from bone (red asterisks); increased physiological signal from the spleen

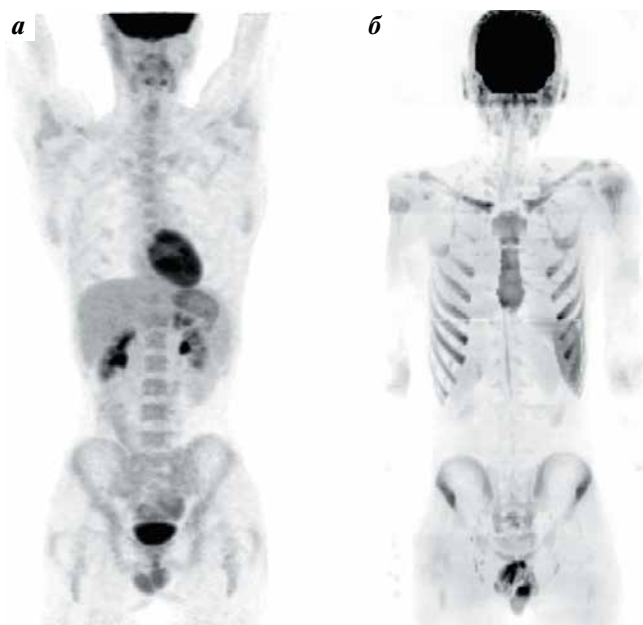


Рис. 2. Данные повторного обследования пациента: а — результаты позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, всего тела (3D-реконструкция). Регресс метаболически активных лимфатических узлов. Полный ответ на лечение; б — результаты диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела (3D-реконструкция). Отсутствие патологически измененных лимфатических узлов. Сохраняется повышенный физиологический магнитно-резонансный сигнал от селезенки и вещества кости

Fig. 2. Re-examination data: a — whole-body positron emission tomography combined with computed tomography (3D reconstruction): regression of metabolically active lymph nodes; complete response to treatment; б — whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging (3D reconstruction): absence of pathologically altered lymph nodes; increased physiological magnetic resonance signal from the spleen and bone persists

Также отмечена безусловно анизотропная (физиологическая) диффузия в селезенке, которая присутствовала во время исследования. При ДВ МРТ для оценки потенциального поражения селезенки применялись в первую очередь размерные критерии и оценка ее структуры. В итоге, несмотря на наличие физиологической повышенной диффузии в селезенке, ее вовлечение в патологический процесс не подтверждено.

Далее повторно выполнены ПЭТ/КТ и ДВ МРТ для оценки динамики (рис. 2). При сравнении полученных результатов отмечено, что оба метода не выявили патологических очагов, на основании чего у пациента констатируется полный ответ на лечение.

При повторной ДВ МРТ у пациента сохраняется повышенный физиологический МР-сигнал от вещества кости и селезенки, что может вызвать трудности при объективной оценке ответа на лечение.

Клинический случай 2

Пациентка Л., 55 лет, диагноз фолликулярной лимфомы 1–2-го цитологического типа с нодулярным характером роста, II стадии, с поражением лимфатических узлов брюшной полости и забрюшинного пространства. Проведено 4 курса паллиативной химиотерапии RB,



Рис. 3. Результаты компьютерной томографии брюшной полости пациентки. Забрюшинно слева — уплотнение клетчатки в области ранее пораженных лимфатических узлов (обведено), увеличения лимфатических узлов не выявлено

Fig. 3. Abdomen computed tomography. Left retroperitoneal — tissue compaction in the area of previously affected lymph nodes (circled), no enlargement of the lymph nodes was detected

достигнута метаболическая ремиссия (данные ПЭТ/КТ от 30.09.2020). До июля 2022 г. пациентке выполнялась поддерживающая иммунотерапия ритуксимабом, в период с 2022 по 2023 г. — ежегодное КТ-исследование для оценки динамики заболевания. Последнее КТ-исследование проведено в сентябре 2023 г. (рис. 3).

В сентябре 2024 г. пациентке выполнена ДВ МРТ. Результаты указывают на фактическое появление нового увеличенного забрюшинного лимфатического узла, что свидетельствует в пользу потенциального прогрессирования основного заболевания (рис. 4).

Поскольку применение только ДВ МРТ для объективного подтверждения прогрессирования болезни недостаточно, пациентке назначена ПЭТ/КТ, по результатам которой четко визуализируются описанный на ДВ МРТ забрюшинный лимфатический узел, имеющий увеличенные размеры, а также гиперметаболизм радиофармацевтического препарата (рис. 5).

На основании результатов ПЭТ/КТ, назначенной благодаря полученным данным ДВ МРТ, у пациентки подтверждено прогрессирование заболевания.

Заключение

Резюмируя обзор литературы с демонстрацией возможностей диагностики, можно с уверенностью заключить, что метод ДВ МРТ имеет большой потенциал и является наиболее привлекательным для диагностики пациентов с лимфопролиферативными заболеваниями на разных этапах, включая первичное стадирование, оценку ответа на лечение и выявление прогрессирования болезни. Метод уже используется во многих областях медицины, однако в случае онкогематологии его эффективность для выявления и оценки поражения костного мозга у пациентов с лимфомами во время и после лечения по-прежнему вызывает сложность.

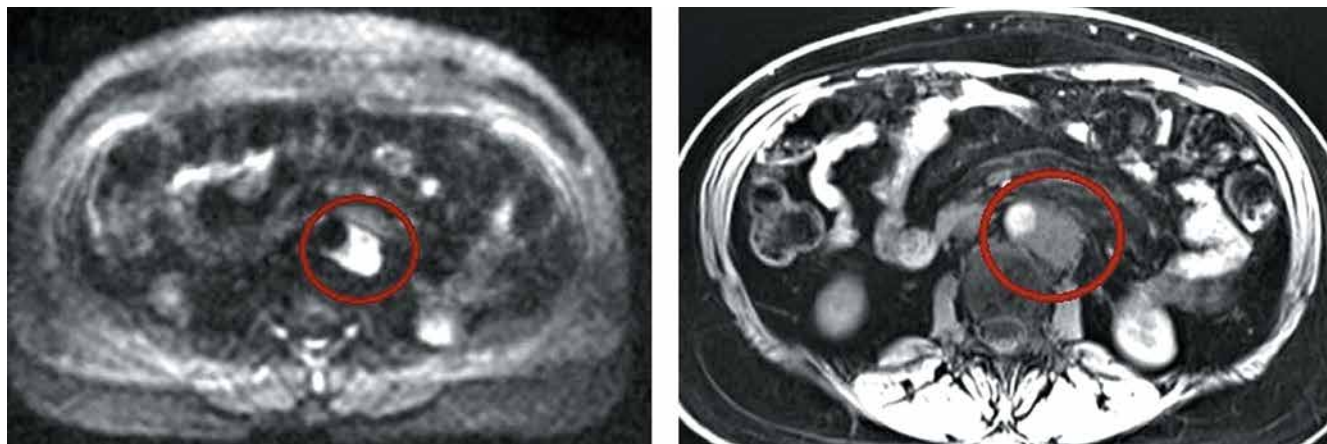


Рис. 4. Результаты диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии. Забрюшинно слева — увеличенный лимфатический узел (обведен)
Fig. 4. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging. Left retroperitoneal — enlarged lymph node (circled)

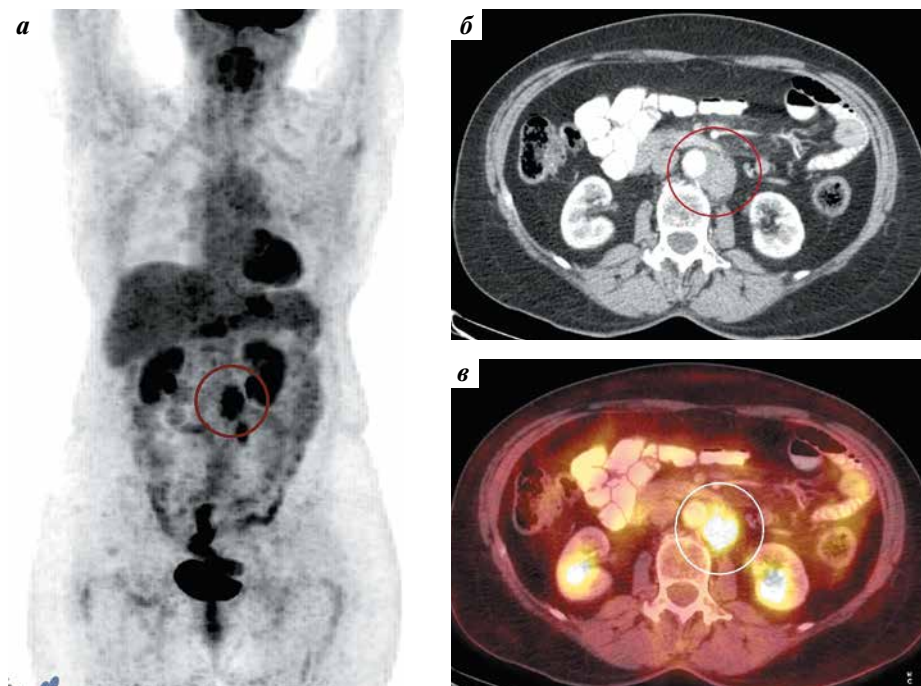


Рис. 5. Результаты позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией: а — 3D-реконструкция; б, в — аксиальные срезы. Забрюшинно слева — увеличенный метаболически активный лимфатический узел (обведен)
Fig. 5. Positron emission tomography combined with computed tomography: а — 3D reconstruction; б, в — axial sections. Left retroperitoneal — enlarged metabolically active lymph node (circled)

Роль ДВ МРТ все еще остается спорной для оценки как поражений селезенки, поскольку имеет физиологический повышенный сигнал, так и лимфатических узлов в средостении из-за артефактов, связанных с сердечными сокращениями и дыхательными движениями.

По сравнению с другими методами ДВ МРТ имеет как неоспоримые преимущества, так и явные ограни-

чения и трудности, требующие дальнейших исследований и наблюдений.

Таким образом, ДВ МРТ является отличной потенциальной альтернативой ПЭТ/КТ с ^{18}F -ФДГ, главным образом за счет отсутствия рентгеновского и ионизирующего излучения на пациента, а также за счет его доступности и дешевизны.

Л И Т Е Р А Т У Р А / R E F E R E N C E S

1. Рукавицын О.А., Троян В.Н., Крюков Е.В. и др. Лучевая диагностика при заболеваниях системы крови. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021. 224 с. DOI: 10.33029/9704-6333-8-DIA-2021-1-224
2. Рукавицын О.А., Троян В.Н., Крюков Е.В. et al. Radiologic diagnostics for blood system diseases. Moscow: GEOTAR-Media, 2021. 224 p. (In Russ.). DOI: 10.33029/9704-6333-8-DIA-2021-1-224
3. Рукавицын О.А., Удалева В.Ю., Агеева Т.А. и др. Гематология: национальное руководство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2024. 916 с. DOI: 10.33029/9704-8188-2-GEM-2024-1-916
4. Rukavitsyn O.A., Udal'eva V.Yu., Ageeva T.A. et al. Hematology: National Guide. 2nd edn, revised and supplemented. Moscow: GEOTAR-Media, 2024. 916 p. (In Russ.). DOI: 10.33029/9704-8188-2-GEM-2024-1-916
5. Glockner J.F., Hu H.H., Stanley D.W. et al. Parallel MR imaging: a user's guide. Radiographics 2005;25(5):1279–97. DOI: 10.1148/rg.255045202
6. Ballon D., Watts R., Dyke J.P. et al. Imaging therapeutic response in human bone marrow using rapid whole-body MRI. Magn Reson Med 2004;52(6):1234–8. DOI: 10.1002/mrm.20291
7. De Bazelaire C., de Kerviler E. From multislice CT to whole-body biomarker imaging in lymphoma patients. Eur Radiol 2011;21(3):555–8. DOI: 10.1007/s00330-010-2035-9
8. Carbone P.P., Kaplan H.S., Musshoff K. et al. Report of the committee on Hodgkin's disease staging classification. Cancer Res 1971;31(11):1860–1.
9. Cheson B.D. Staging and response assessment in lymphomas: the new Lugano classification. Chin Clin Oncol 2015;4(1):5. DOI: 10.3978/j.issn.2304-3865.2014.11.03
10. Cheson B.D., Fisher R.I., Barrington S.F. et al. Recommendations for initial evaluation, staging, and response assessment of Hodgkin and non-Hodgkin lymphoma: the Lugano classification. J Clin Oncol 2014;32(27):3059–68. DOI: 10.1200/JCO.2013.54.8800
11. Brenner D., Elliston C., Hall E. et al. Estimated risks of radiation-induced fatal cancer from pediatric CT. AJR Am J Roentgenol 2001;176(2):289–96. DOI: 10.2214/ajr.176.2.1760289
12. Mathews J.D., Forsythe A.V., Brady Z. et al. Cancer risk in 680,000 people exposed to computed tomography scans in childhood or adolescence: data linkage study of 11 million Australians. BMJ 2013;346:f2360. DOI: 10.1136/bmj.f2360
13. Jerusalem G., Beguin Y., Najjar F. et al. Positron emission tomography (PET) with 18F-fluorodeoxyglucose (18F-FDG) for the staging of low-grade non-Hodgkin's lymphoma (NHL). Ann Oncol 2001;12(6):825–30. DOI: 10.1023/a:1011169332265
14. Townsend D.W. Multimodality imaging of structure and function. Phys Med Biol 2008;53(4):R1–39. DOI: 10.1088/0031-9155/53/4/R01
15. Kwee T.C., Takahara T., Ochiai R. et al. Whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging. Eur J Radiol 2009;70(3):409–17. DOI: 10.1016/j.ejrad.2009.03.054
16. Darge K., Jaramillo D., Siegel M.J. Whole-body MRI in children: current status and future applications. Eur J Radiol 2008;68(2):289–98. DOI: 10.1016/j.ejrad.2008.05.018
17. Wong F.C., Kim E.E. A review of molecular imaging studies reaching the clinical stage. Eur J Radiol 2009;70(2):205–11. DOI: 10.1016/j.ejrad.2009.01.049
18. Lin C., Luciani A., Itti E. et al. Whole-body diffusion-weighted magnetic resonance imaging with apparent diffusion coefficient mapping for staging patients with diffuse large B-cell lymphoma. Eur Radiol 2010;20(8):2027–38. DOI: 10.1007/s00330-010-1758-y
19. Dudeck O., Zeile M., Pink D. et al. Diffusion-weighted magnetic resonance imaging allows monitoring of anticancer treatment effects in patients with soft-tissue sarcomas. J Magn Reson Imaging 2008;27(5):1109–13. DOI: 10.1002/jmri.21358
20. Wu X., Kellokumpu-Lehtinen P.L., Pertovaara H. et al. Diffusion-weighted MRI in early chemotherapy response evaluation of patients with diffuse large B-cell lymphoma – a pilot study: comparison with 2-deoxy-2-fluoro-D-glucose-positron emission tomography/computed tomography. NMR Biomed 2011;24(10):1181–90. DOI: 10.1002/nbm.1689
21. Chen Y., Zhong J., Wu H., Chen N. The clinical application of whole-body diffusion-weighted imaging in the early assessment of chemotherapeutic effects in lymphoma: the initial experience. Magn Reson Imaging 2012;30(2):165–70. DOI: 10.1016/j.mri.2011.09.019
22. Gu J., Chan T., Zhang J. et al. Whole-body diffusion-weighted imaging: the added value to whole-body MRI at initial diagnosis of lymphoma. AJR Am J Roentgenol 2011;197(3):W384–91. DOI: 10.2214/AJR.10.5692
23. Stéphane V., Samuel B., Vincent D. et al. Comparison of PET-CT and magnetic resonance diffusion weighted imaging with body suppression (DWIBS) for initial staging of malignant lymphomas. Eur J Radiol 2013;82(11):2011–7. DOI: 10.1016/j.ejrad.2013.05.042
24. Van Ufford H.M., Kwee T.C., Beek F.J. et al. Newly diagnosed lymphoma: initial results with whole-body T1-weighted, STIR, and diffusion-weighted MRI compared with 18F-FDG PET/CT. AJR Am J Roentgenol 2011;196(3):662–9. DOI: 10.2214/AJR.10.4743
25. Padhani A.R., Koh D.M., Collins D.J. Whole-body diffusion-weighted MR imaging in cancer: current status and research directions. Radiology 2011;261(3):700–18. DOI: 10.1148/radiol.11110474
26. Le Bihan D., Poupon C., Amadon A., Lethimonnier F. Artifacts and pitfalls in diffusion MRI. J Magn Reson Imaging 2006;24(3):478–88. DOI: 10.1002/jmri.20683
27. Nasu K., Kuroki Y., Sekiguchi R. et al. Measurement of the apparent diffusion coefficient in the liver: is it a reliable index for hepatic disease diagnosis? Radiat Med 2006;24(6):438–44. DOI: 10.1007/s11604-006-0053-y
28. Koh D.M., Padhani A.R. Diffusion-weighted MRI: a new functional clinical technique for tumour imaging. Br J Radiol 2006;79(944):633–5. DOI: 10.1259/bjr/29739265
29. Connors J.M. State-of-the-art therapeutics: Hodgkin's lymphoma. J Clin Oncol 2005;23(26):6400–8. DOI: 10.1200/JCO.2005.05.016
30. Eissa L., Abdel Razek A.A.K., Helmy E. Arterial spin labeling and diffusion-weighted MR imaging: utility in differentiating idiopathic orbital inflammatory pseudotumor from orbital lymphoma. Clin Imaging 2021;71:63–8. DOI: 10.1016/j.clinimag.2020.10.057
31. Eraky A.M., Beck R.T., Treffy R.W. et al. Role of advanced MR imaging in diagnosis of neurological malignancies: current status and future perspective. J Integr Neurosci 2023;22(3):73. DOI: 10.31083/j.jin2203073
32. Giraudo C., Simeone R., Fosio M. et al. Diagnostic value of PET/MR with DWI for Burkitt lymphoma. Diagnostics (Basel) 2021;11(10):1867. DOI: 10.3390/diagnostics11101867
33. Hwang S., Panicek D.M. Magnetic resonance imaging of bone marrow in oncology, Part 2. Skeletal Radiol 2007;36(11):1017–27. DOI: 10.1007/s00256-007-0308-4
34. Liu Y., Wang Y., Wang P., Yu Q. A retrospective study to evaluate the CT and MR imaging findings of non-Hodgkin's lymphoma affecting the jaw bones. Oral Radiol 2022;38(4):509–16. DOI: 10.1007/s11282-021-00582-y
35. Sharma S., Leung W.H., Deqing P. et al. Osteonecrosis in children after allogeneic hematopoietic cell transplantation: study of prevalence, risk factors and longitudinal changes using MR imaging. Bone Marrow Transplant 2012;47(8):1067–74. DOI: 10.1038/bmt.2011.234
36. Siegel R.L., Miller K.D., Wagle N.S. et al. Cancer statistics, 2023. CA Cancer J Clin 2023;73(1):17–48. DOI: 10.3322/caac.21763

35. Thuy T.T.M., Trang N.T.H., Vy T.T. et al. Role of diffusion-weighted MRI in differentiation between benign and malignant anterior mediastinal masses. *Front Oncol* 2022;12:985735. DOI: 10.3389/fonc.2022.985735
36. Toledano-Massiah S., Luciani A., Itti E. et al. Whole-body diffusion-weighted imaging in Hodgkin lymphoma and diffuse large B-cell lymphoma. *Radiographics* 2015;35(3):747–64. DOI: 10.1148/rg.2015140145
37. Winzer R., Hoberück S., Zöphel K. et al. Diffusion-weighted MRI for initial staging in Hodgkin's lymphoma: comparison with FDG PET. *Eur J Radiol* 2020;123:108775. DOI: 10.1016/j.ejrad.2019.108775

Вклад авторов

С.А. Алексеев: разработка концепции и дизайна исследования, сбор, анализ и интерпретация данных, подготовка статьи;
В.Н. Троян: проверка критически важного интеллектуального содержания, окончательное одобрение статьи;
О.А. Рукавицын: проверка критически важного интеллектуального содержания;
А.А. Трефилов: разработка дизайна исследования.

Authors' contributions

S.A. Alekseev: concept and design development, data collection, analysis and interpretation, article writing;
V.N. Troyan: verification of critical intellectual content, final article approval;
O.A. Rukavitsyn: verification of critical intellectual content;
A.A. Trefilov: design development.

ORCID авторов / ORCID of authors

С.А. Алексеев / S.A. Alekseev: <https://orcid.org/0000-0003-1329-8689>
В.Н. Троян / V.N. Troyan: <https://orcid.org/0000-0002-8008-9660>
О.А. Рукавицын / O.A. Rukavitsyn: <https://orcid.org/0000-0002-1309-7265>
А.А. Трефилов / A.A. Trefilov: <https://orcid.org/0000-0002-9885-5829>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Финансирование. Работа выполнена без спонсорской поддержки.

Funding. The work was performed without external funding.

Соблюдение прав пациентов. Пациенты подписали информированное согласие на публикацию своих данных.

Compliance with patient rights. The patients gave written informed consent to the publication of their data.