

ISSN 2782-3806

ISSN 2782-3814 (Online)

УДК 616-006.448-073.75

<https://doi.org/10.18705/2782-3806-2025-5-6-462-480>

Методы лучевой визуализации при множественной миеломе

А. М. Климович, Г. Е. Труфанов, Г. Н. Салогуб

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

Контактная информация:

Климович Анастасия Михайловна,
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава
России,
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,
Россия, 197341.
E-mail: vargina.anast@yandex.ru

РЕЗЮМЕ

Множественная миелома — В-клеточное лимфопролиферативное заболевание, морфологическим субстратом которого выступают плазматические клетки. Одним из характерных клинических симптомов заболевания является поражение костей скелета, что входит в понятие диагностических критериев акронима CRAB. Широко внедренные различные рентгенологические и совмещенные методы используются для диагностики, стадирования, а также оценки глубины ответа на терапию.

В данной статье рассматриваются актуальные подходы к визуализации поражения костей скелета и экстрамедуллярных проявлений множественной миеломы, диагностические возможности и особенности применения лучевых методов в клинической практике.

Ключевые слова: множественная миелома, лучевая диагностика, позитронно-эмиссионная томография, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, гематология

Для цитирования: Климович А.М., Труфанов Г.Е., Салогуб Г.Н. Методы лучевой визуализации при множественной миеломе. *Российский журнал персонализированной медицины*. 2025;5(6):462-480. <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2025-5-6-462-480>; <https://elibrary.ru/OEGFXN>

The imaging techniques in multiple myeloma

Anastasiya M. Klimovich, Gennady E. Trufanov, Galina N. Salogub

Federal State Budgetary Institution "V. A. Almazov National Medical Research Centre" of the Ministry of Health of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

Corresponding author:

Anastasiya M. Klimovich,
V. A. Almazov NMRC,
2 Akkuratova str., St. Petersburg, Russia,
197341.
E-mail: vargina.anast@yandex.ru

ABSTRACT

MM is a B-cell lymphoproliferative disorder whose morphological substrate is plasma cells. One of the characteristic clinical manifestations of the disease is skeletal involvement, which is included in the diagnostic criteria of the CRAB acronym. Various widely adopted radiological and combined methods are used for diagnosis, staging, and assessment of the depth of response to therapy.

This article discusses current approaches to imaging skeletal involvement and extramedullary manifestations of multiple myeloma, the diagnostic capabilities and features of application of radiological methods in clinical practice.

Keywords: multiple myeloma, radiology, positron emission tomography, computed tomography, magnetic resonance imaging, hematology

For citation: Klimovich AM, Trufanov GE, Salogub GN. The imaging techniques in multiple myeloma. *Russian Journal for Personalized Medicine*. 2025;5(6):462-480. (In Russ.) <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2025-5-6-462-480>; <https://elibrary.ru/OEGFXN>

Список сокращений: МГУС/МГНЗ (MGUS) — моноклональная гаммапатия неопределенного значения (monoclonal gammopathy of undetermined significance), ММ (multiple myeloma) — множественная миелома, SMM (smoldering multiple myeloma) — тлеющая множественная миелома, NDMM (newly diagnosed multiple myeloma) — впервые диагностированная множественная миелома, MDE (myeloma defined event) — определяющее миелому событие, IMWG (International Myeloma Working Group) — Международная рабочая группа по множественной миеломе, HRC-статус (high-risk cytogenetic status, HRC-status) — цитогенетический статус высокого риска, ауто-ТГСК (autologous hematopoietic stem cell transplantation, auto-TGSC) — трансплантация аутологичных гемопоэтических стволовых клеток, FLC (free light chains) — свободные легкие цепи, CRAB (hyperCalcemia, Renal insufficiency, Anemia, Bone lesions) — гиперкальциемия, почечная недостаточность, анемия и поражения костей, КТ (computed tomography, CT) — компьютерная томография, WBLDCT (whole-body low-dose computed tomography) — низкодозная компьютерная томография всего тела (НДКТ всего тела), ПЭТ/КТ (positron emission tomography/computed tomography, PET/CT) — позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с рентгеновской компьютерной томографией, 18-ФДГ (18F-FDG) — 18-фтордезоксиглюкоза, 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ (18F-fluorodeoxyglucose-positron emission tomography, 18F-FDG-PET/CT) — позитронно-эмиссионная томография, совмещенная с рентгеновской компьютерной томографией с использованием радиофармпрепарата 18-фтордезоксиглюкоза, МРТ (magnetic resonance imaging, MRI) — магнитно-резонансная томография, T1-ВИ (T1WI) — T1-взвешенные изображения, T2-ВИ (T2WI) — T2-взвешенные изображения, T2-ВИ FS (T2WI FS) — T2-взвешенные изображения в режиме жироподавления, STIR (short tau inversion recovery) — магнитно-резонансная импульсная последовательность инверсия-восстановление спинного эха (инверсия-восстановление с коротким T1), DWI (diffusion weighted imaging) — диффузионно-взвешенная визуализация, ИКД (apparent diffusion coefficient, ADC) — измеряемый коэффициент диффузии, DWI-ADC — создание карт кажущегося коэффициента диффузии на основе диффузионно-взвешенных изображений, WB-DWI (whole-body diffusion weighted imaging) — диффузионно-взвешенная магнитно-резонансная томография всего тела, WB-MRI (whole-body magnetic resonance imaging) — магнитно-резонансная томография всего тела, AS-MRI (axial skeleton magnetic resonance imaging) — аксиальная магнитно-резонансная томография осевого скелета.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Множественная миелома (ММ) составляет приблизительно 1 % всех злокачественных опухолей и до 10–15 % всех опухолей кроветворной и лимфоидной тканей. Заболеваемость составляет 3–5 случаев на 100 000 населения, средний возраст — 63 года, распространенность заболевания среди населения моложе 40 лет не превышает 2 % [1].

От болезни Рустицкого-Калера к плазмоклеточной миеломе (историческая справка)

История изучения множественной миеломы (ММ) продолжается уже почти два века. Первое хорошо задокументированное описание заболевания датировано 1844 г. и принадлежит английскому врачу Samuel Solly, наблюдавшему 2 парализованных пациенток с необычно множественными переломами и деформациями скелета, сопровождающимися тяжелыми костными болями [2].



Рис. 1. Пациентка врача Samuel Solly с множественными переломами и деформациями скелета [2]

Fig. 1. A patient of Dr. Samuel Solly with multiple fractures and skeletal deformities [2]

В 1846 г. хирург J. Dalrymple выявил при поражении костей данным заболеванием клетки множественной миеломы (плазматические клетки) [3].

Российский хирург О. А. Рустицкий в 1873 г. ввел термин «множественная миелома», обратив

внимание на множественные поражения костей скелета, обусловленные инфильтрацией плазматическими (миеломными) клетками [3, 4]. В 1904 г. врач F. P. Weber предложил использовать рентгенографию для обнаружения в костях очагов лизиса при множественной миеломе [5].

Первую систему стадирования множественной миеломы (ММ) разработали американские исследователи Durie и Salmon в 1975 г., где ключевым параметром выступала корреляция между объемом опухолевой массы и выраженностью остеодеструктивного синдрома [1, 6]. В дальнейшем, для повышения точности диагностики костных повреждений, Международной рабочей группой по изучению ММ в 2003 г. были предложены стандартизированные рекомендации. Эти рекомендации регламентировали применение методов рентгенологического исследования с целью объективной верификации характера и степени костных поражений [6, 7].

В 2016 г. также Международная рабочая группа по миеломе сообщила о новых консенсусных критериях, которые включили результаты оценки минимальной остаточной болезни (МОБ), в том числе с использованием методов визуализации [8, 9].

Согласно клиническим рекомендациям, ММ — это В-клеточное злокачественное новообразование, морфологическим субстратом которого являются клональные плазматические клетки, в большинстве случаев способные продуцировать моноклональный иммуноглобулин и/или легкие цепи иммуноглобулинов [1, 10]. Для данной патологии характерно поражение не только костного мозга и почек, но и опорно-двигательного аппарата.

СТАДИРОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИИ

Поражение костей скелета в настоящее время входит в качестве обязательного критерия ММ, требующей лечения (табл. 1) [10].

Отдельный интерес представляет собой плазмодитомы, для которой характерно изолированное одноклеточное (крайне редко многоочаговое) поражение костей или органов без их дисфункций и отсутствием данных о поражении/незначительным поражением костного мозга [10] (табл. 2).

Рентгенография, КТ и МРТ — основные методы визуализации костных и внекостных проявлений множественной миеломы.

Таблица 1. Диагностические критерии ММ [11]

Table 1. Diagnostic criteria for symptomatic MM [11]

Для установления диагноза множественной миеломы необходим пункт 1 и любой из пунктов 2 или 3		
1	≥ 10 % клональных плазматических клеток в аспирате костного мозга или наличие экстрамедуллярной плазмодитомы	
2	Наличие поражения органов-мишеней (минимум одно из перечисленных ниже):	
	<u>C</u> (кальций)	Кальций сыворотки ≥11,5 мг/дл
	<u>R</u> (почки)	Креатинин сыворотки >177 мкмоль/л (>2 мг/дл) или клиренс креатинина <40 мл/мин
	<u>A</u> (анемия)	Hb <100 г/л или на 20 г/л меньше нижней границы нормы
	<u>B</u> (кости)	≥1 очага лизиса в костной ткани размером >5 мм, выявленный при выполнении КТ, ПЭТ/КТ или МСКТ в низкодозовом режиме
3	Биомаркеры злокачественности (минимум один из перечисленных) (SLiM)	
	- Количество клональных плазматических клеток в аспирате костного мозга ≥60 %. - Соотношение вовлеченных/невовлеченных свободных легких цепей (FLC) иммуноглобулинов сыворотки ≥100, при условии, что абсолютный уровень вовлеченной легкой цепи не менее 100 мг/л (вовлеченная свободная легкая цепь каппа или лямбда — это та, которая находится выше референсного диапазона; невовлеченная легкая цепь — это та, которая обычно находится в нормальном диапазоне или ниже). - Более одного очага поражения в костях скелета размером более 5 мм по результатам МРТ.	

Таблица 2. Критерии солитарной плазмоцитомы [11]**Table 2.** Criteria for solitary plasmacytoma [11]

Солитарная плазмоцитомы	1. Подтвержденное биопсией одиночное поражение костей или мягких тканей с выявлением клональных плазматических клеток. 2. Нормальный костный мозг без клональных плазматических клеток. 3. Нет изменений в костях скелета и очагов при проведении МРТ (или КТ) позвоночника и таза (за исключением первичного одиночного очага). 4. Отсутствие гиперкальциемии, почечной недостаточности, анемии и поражения костей (CRAB) или амилоидоза, которые могут быть связаны с пролиферацией плазматических клеток.
-------------------------	---

ВОЗМОЖНОСТИ КЛАССИЧЕСКОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Наиболее распространенными рентгенологическими феноменами, регистрируемыми при обследовании костной системы в рамках диагностики данного заболевания, являются множественные литические очаги. Данные образования визуализируются в качестве четко отграниченных зон деструкции, хорошо дифференцирующихся на фоне окружающей их интактной костной ткани [12]. Параллельно с очаговыми изменениями зачастую наблюдается снижение рентгенологической плотности костей (остеопения), а также такие специфические признаки, как подчеркнутость контуров замыкательных пластин тел позвонков и усиление их вертикальной трабекулярной исчерченности. Комплекс этих проявлений может указывать не только на диффузный остеопороз, но и на формирование фестончатости эндоста. К характерным рентгенологическим проявлениям также следует отнести картину мелкоячеистой (пористой) перестройки структуры плоских костей и возникновение патологических переломов, наиболее типичных для тел позвонков и проявляющихся в виде компрессии с уменьшением высоты и формированием клиновидной деформации в их передних отделах [12].

Однако рентгенографическая методика обладает рядом существенных диагностических ограничений. Установлено, что в 33–35 % случаев применение стандартной рентгенографии не обеспечивает детекции литических дефектов, что особенно актуально для таких анатомических областей, как кости черепа, грудина, ребра, таз, тела позвонков, а также проксимальные отделы бедренных и плечевых костей [6, 7, 12]. Дополнительным практическим недостатком метода является его значительная трудоемкость и временная продолжительность на этапе первичной диагностики, что обусловлено необходимостью выполнения обзорных снимков всего скелета. При этом методика сохраняет свою диагностическую ценность для оценки состояния костей свода черепа и диафизов трубчатых костей [12].

Патогенетической основой преимущественного поражения определенных костных структур является выраженная тропность множественной миеломы к аксиальному скелету, в особенности к позвоночному столбу. Данная избирательность объясняется наибольшей концентрацией активного красного костного мозга, выполняющего кроветворную функцию, именно в этих анатомических областях [12]. Статистический анализ показывает, что литические очаги наиболее часто (примерно в 70 % наблюдений) развиваются в телах позвонков, с преобладанием в грудном (45,9 %) и поясничном (38,1 %) отделах и значительной реже — в шейном отделе (2,7 %) [12, 13]. На последующих позициях по частоте поражения находятся бедренные и плечевые кости (около 50 % случаев), кости таза и черепа (до 40 %), а также ребра, ключицы и нижняя челюсть [12].

Несмотря на сохраняющееся использование в рутинной клинической практике, чувствительность традиционной рентгенографии остается недостаточной для ранней диагностики. Метод позволяет визуализировать остеолитический очаг лишь после достижения в нем критического уровня деминерализации костного матрикса, который, согласно данным литературы, составляет 30–40 % от исходной минеральной плотности [6].

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

При проведении компьютерной томографии (КТ) у пациентов с множественной миеломой визуализационная картина коррелирует с данными, получаемыми при стандартной рентгенографии, однако томографический метод демонстрирует существенно более высокую чувствительность в детекции остеолитических очагов малых размеров [12, 14]. К числу характерных томографических семиотических признаков данной нозологии относятся: выраженные проявления диффузного снижения минеральной плотности костной ткани (остеопении), множественные

литические фокусы деструкции, специфический паттерн, известный в литературе как «мини-мозг» (представленный криволинейными гиподенсными округлыми структурами, визуально ассоциирующимися с церебральными извилинами), а также наличие патологических переломов и экстраоссальных компонентов опухолевого процесса.

Согласно данным исследований, патологические компрессионные переломы тел позвонков формируются у 60–70 % лиц, страдающих множественной миеломой. Наиболее часто деструктивному процессу подвергается непосредственно тело позвонка, а прогрессирующий рост опухоли с инвазией в эпидуральное пространство способен приводить к развитию неврологической симптоматики. Необходимо акцентировать, что, хотя манифестация заболевания с неврологического дефицита отмечается лишь у приблизительно 2 % пациентов, его своевременная верификация приобретает критическое клиническое значение [12]. Компрессия структур спинного мозга и/или корешков спинномозговых нервов диагностируется в 10–20 % случаев множественной миеломы [15]. Аналогичный компрессионный синдром может возникать и при солитарной плазмцитоме, особенно при ее локализации в эпидуральном пространстве, а также вследствие компрессионных переломов, обусловленных деструкцией кортикального слоя позвонков. С точки зрения характера распространения, при ММ возможно выделить несколько форм: локальную (солитарную плазмцитому), характеризующуюся монокостным или моноорганным опухолевым разрастанием; генерализованную (диффузно-очаговую) с мультифокальным поражением нескольких костных структур или органов; диффузную, при которой наблюдается тотальная инфильтрация костного мозга плазматическими клетками [16].

Сравнительные исследования визуализационных методик свидетельствуют о том, что компьютерная томография обладает статистически значимо более высокой частотой и достоверностью в обнаружении остеолитических изменений. В свою очередь, методы магнитно-резонансной томографии (МРТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), в силу своих исключительных разрешающих способностей, предоставляют уникальную возможность для визуализации и оценки степени инфильтрации костного мозга опухолевыми плазмцитами [17].

Следует отметить, что чувствительность КТ в диагностике компрессионных переломов тел позвонков превосходит таковую не только у классической рентгенографии, но и у МРТ [18]. Тем не менее, значимым ограничивающим фактором применения стандартного протокола КТ выступает сопряженная с исследованием высокая лучевая нагрузка, что исторически препятствовало его многократному использованию

для задач динамического контроля и оценки ответа на проводимую терапию. Доза облучения при стандартной КТ превышает аналогичный показатель для традиционной рентгенографии в 1,3–2,9 раза. В целях радикального снижения радиационного воздействия при сохранении высоких диагностических качеств изображения для контингента пациентов с ММ был предложен и внедрен в клиническую практику специальный протокол низкодозной компьютерной томографии всего тела (НДКТ), разработанный Norger и соавторами [19]. На текущий момент применение низкодозной КТ всего скелета при множественной миеломе утвердилось в качестве стандарта визуализационной диагностики [20].

Сравнительный анализ демонстрирует, что низкодозная КТ, в противопоставление классической рентгенографии, обеспечивает более точную и объективную оценку распространенности патологического процесса. Это достигается за счет лучшей визуализации степени выраженности остеолита и наличия костных плазмцитом, которые не только разрушают кортикальный слой, но и часто проявляют тенденцию к экстраоссальному распространению.

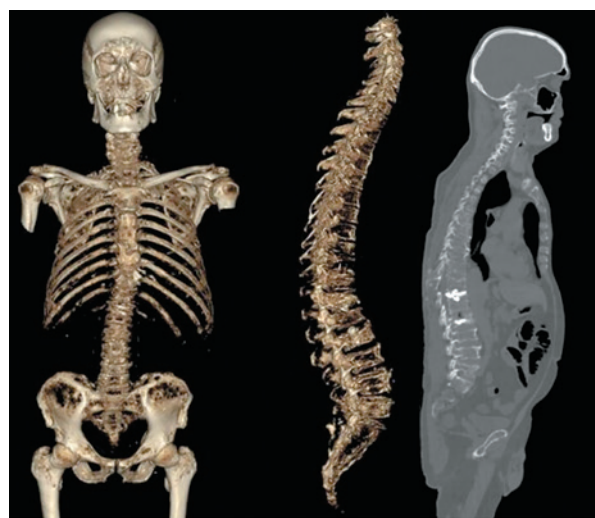


Рис. 2. Низкодозная КТ костей скелета (3D-реконструкция и реконструкция в сагиттальной плоскости). Множественные очаги деструкции в ребрах, лопатках, черепе, грудице, позвонках, костях таза, малого вертела правой бедренной кости; компрессионные переломы тел грудных и поясничных позвонков, патологические переломы ребер [6]

Fig. 2. Low-dose CT scan of skeletal bones (3D reconstruction and sagittal section): multiple osteodestructions in the ribs, scapulae, skull, sternum, vertebrae, pelvis bones, right fibulae; compression fractures of thoracic and lumbar vertebral bodies, pathological rib fractures [6]

Таким образом, низкодозная компьютерная томография всего тела в настоящее время представляет собой один из ключевых методов как первичной диагностики, так и последующего мониторинга течения множественной миеломы, являясь предпочтительным методом визуализации костных дефектов [6] (рис. 2–4).

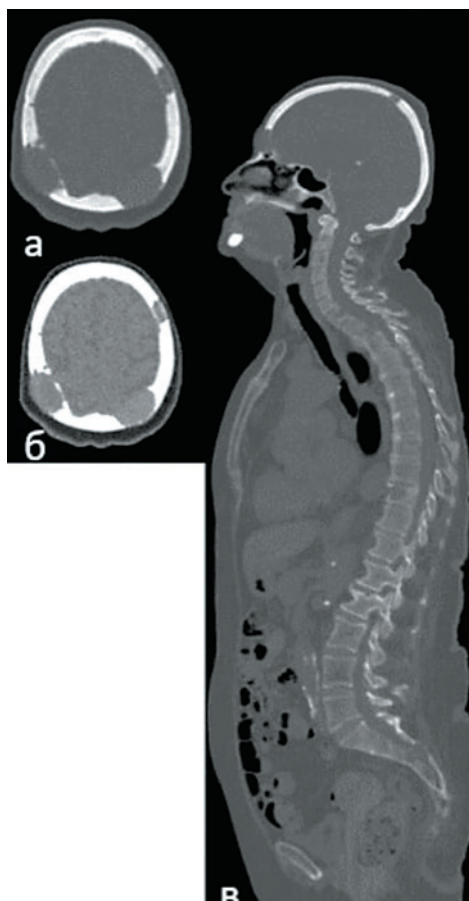


Рис. 3. Низкодозная КТ всего скелета. Множественные очаги деструкции с костными плазмоцитомами с поражением коркового слоя и распространением мягкотканного субстрата плазмоцитомы интра- и экстракраниально

Примечания: а — костный режим; б — мягкотканый режим; в — множественные очаги деструкции в позвонках, правой ключице, крестце; компрессионные переломы тел грудных и поясничных позвонков (реконструкция в сагиттальной плоскости) [6].

Fig. 3. Low-dose whole skeleton CT: multiple osteodestructures with bone plasmacytomas with interruption of cortical layer and spread of soft tissue substrate of plasmacytoma intra- and extracranial

Notes: а — bone mode; б — soft tissue mode; в — multiple osteodestructures in vertebrae, right clavicle, sacrum; compression fractures of thoracic and lumbar vertebral bodies (sagittal slice) [6].

Несмотря на то, что рентгенография костей скелета до сих пор фигурирует в международных и национальных клинических рекомендациях по диагностике ММ, низкодозная КТ, обладающая несопоставимо более высокой информативностью (что, согласно актуальным данным [11], не сопряжено с потерей диагностической точности), как метод с повышенной чувствительностью к остеолитическим очагам закономерно должна заместить классическую рентгенографию в диагностическом алгоритме [6].



Рис. 4. Низкодозная КТ всего тела (3D-реконструкция): множественные очаги деструкции в позвонках, правой ключице, крестце, подвздошных костях; компрессионные переломы тел грудных и поясничных позвонков [6]

Fig. 4. Low-dose CT scan of the entire skeleton (3D-reconstruction): multiple osteodestructures in the vertebrae, right clavicle, sacrum, and iliac bones; compression fractures of the thoracic and lumbar vertebral bodies [6]

ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕННОЙ ПЭТ/КТ

В современной онкогематологической практике метод гибридной визуализации, интегрирующий позитронно-эмиссионную и компьютерную рентгеновскую томографию (ПЭТ/КТ) с применением радиофармацевтического диагностического агента на основе 18-фтордезоксиглюкозы (18-ФДГ), признается одним из ключевых инструментов не только для первичной верификации диагноза множественной миеломы, но и для динамической оценки прогностических перспектив и мониторинга терапевтического ответа на проводимое лечение.

Тем не менее, данная высокотехнологичная методика не лишена определенных диагностических ограничений. В частности, ее диагностическая ценность снижается в ситуациях, сопряженных с необходимостью идентификации очаговых образований малых размеров, а также при диффузном, а не очаговом характере инфильтрации костного мозга, особенно в анатомически сложных зонах, таких как костные структуры таза и позвоночника, что подтверждается данными исследований [12].

Важно подчеркнуть, что, несмотря на отмеченные технико-диагностические недостатки, методика ПЭТ/

КТ с 18-ФДГ в настоящее время позиционируется в рамках актуальных клинических рекомендаций как один из наиболее перспективных методов лучевой диагностики, который в определенных клинических сценариях может рассматриваться в качестве альтернативы низкодозной компьютерной томографии при решении вопроса о первичном выборе способа визуализации с целью детекции и характеристики костных деструктивных изменений, ассоциированных с течением ММ [21] (рис. 5).

Таким образом, сочетая морфологическую и функциональную визуализацию, ПЭТ/КТ с 18-ФДГ

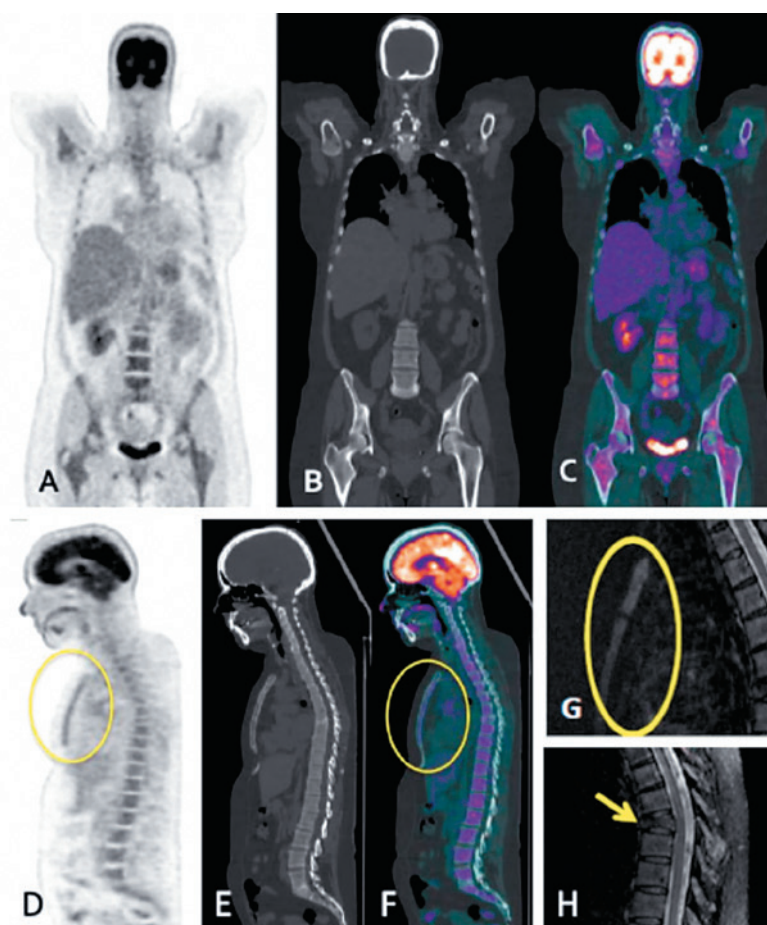


Рис. 5. На ПЭТ/КТ-изображениях пациентки с тлеющей множественной миеломой, выполненных во фронтальной и сагиттальной плоскостях, визуализируется диффузное поражение костного мозга с высокой метаболической активностью

Примечание: Данные МРТ (импульсная последовательность STIR) позвоночника подтверждают поражение грудины и наличие оскольчатого перелома Th7 с пролабированием задних отделов тела позвонка в позвоночный канал. Этот перелом не был дифференцирован на ФДГ-ПЭТ из-за ограниченного разрешения метода и отсутствия метаболической активности в зоне перелома.

Fig. 5. PET/CT images in coronal (A-C) and sagittal (D-F) of female with SMM show diffuse MM involvement of the bone marrow with intense metabolic activity in the axial and peripheral skeleton, and sternal involvement (circles)

Note: Spine STIR sagittal sequence (G, H) showing increased bone marrow sternal signal (circle), concordant with FDG-PET/CT findings and burst fracture in Th7 vertebral body with slight posterior wall retropulsion (arrows) poorly visualized in the FDG-PET study because of its lower resolution and absence of metabolic activity [22].

в настоящее время считается стандартным методом визуализации при ММ для ее стадирования, несмотря на ложноположительные/ложноотрицательные результаты, и оценки ответа на терапию [23].

Именно ложноотрицательные результаты при проведении ПЭТ/КТ-исследования с использованием ^{18}F -ФДГ в качестве трейсера способствовали разработке других ПЭТ-трейсеров. Так, был разработан радиофармпрепарат на основе ^{11}C -MET. В крупнейшей ретроспективной серии исследований, где сравнивались ^{18}F -ФДГ-ПЭТ/КТ и ПЭТ/КТ с ^{11}C -MET, очаги поражения были обнаружены у 60 % с помощью ^{18}F -ФДГ-ПЭТ/КТ и у 76 % — с помощью ПЭТ/КТ с ^{11}C -MET ($p < 0,01$), что привело к дополнительному выявлению заболевания у 12 пациентов [24]. В проспективном исследовании у лиц с предлеченной миеломой и полученным отрицательным результатом при проведении ^{18}F -ФДГ-ПЭТ/КТ, ПЭТ/КТ с ^{11}C -MET показала очаговое накопление в остеолитических очагах у 71 % больных. Эти данные показывают, что в отдельных случаях ПЭТ/КТ с ^{11}C -MET может рассматриваться как альтернатива для пациентов с отрицательными результатами при ^{18}F -ФДГ-ПЭТ/КТ [24].

Визуализацию молекулярных мишеней, на которые нацелены существующие терапевтические схемы лечения множественной миеломы, также можно проводить с помощью меченых моноклональных антител, например, нацеленных на рецептор CD38 на поверхности миеломных клеток с помощью ^{89}Zr -DFO-Даратумумаба. Для определения места использования новых трейсеров необходимы проспективные многоцентровые исследования, прежде чем их можно будет интегрировать в рутинную практику [25].

Внедрение новых ПЭТ-трейсеров, возможно, сможет решить проблему ложноотрицательных результатов, но их применение ограничено низкой доступностью, отсутствием локального циклотрона для радиофармпрепаратов с коротким периодом полураспада, отсутствием стандартизации и потребностью в дополнительных проспективных данных [23].

ВОЗМОЖНОСТИ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

В 2014 г. метод МРТ был включен в обновленные критерии Международной рабочей группы по изучению миеломы (табл. 2). Так, наличие >1 очага поражения костного мозга размером ≥ 5 мм по результатам МРТ считается достаточным для подтверждения диагноза симптоматической ММ, требующей начала лечения [26].

Среди арсенала лучевых диагностических технологий именно МРТ демонстрирует наивысшие

показатели чувствительности при выявлении патологических изменений позвоночного столба и инвазии структур спинного мозга, обусловленных течением ММ. Характерные патологические изменения, визуализируемые при МР-сканировании, регистрируются у подавляющего большинства пациентов с симптоматической формой заболевания, имеющей соответствующее клиническое подтверждение, а также у значительной доли (от 29 % до 50 %) лиц с диагностированной тлеющей (бессимптомной) множественной миеломой [14].

Необходимо акцентировать, что, хотя возможности МРТ в объективной количественной оценке степени деструкции костной ткани несколько ограничены, данный метод предоставляет клиницисту уникальные диагностические преимущества. К их числу относится способность к точной визуализации и измерению экстрamedулярного (мягкотканного) компонента опухолевого образования, детальному анализу его пространственного взаимоотношения с критически важными сосудистыми и нервными структурами, а также выявлению очагов геморрагического пропитывания опухолевой стромы. Кроме того, МРТ служит высокоинформативным инструментом для дифференциальной диагностики между патологическими переломами позвонков, имеющими в своей основе остеопороз, и переломами, вызванными прямой опухолевой деструкцией, что становится особенно релевантным в отсроченном периоде после компрессионного события [27].

Дифференцирующим МР-критерием в этой ситуации выступает динамика изменения сигнальных характеристик костного мозга в зоне перелома. При выполнении контрольного МР-исследования спустя 3–6 недель после компрессии позвонка опухолевого генеза типичной находкой является регистрация зоны с гипоинтенсивным (сниженным) сигналом на T1-взвешенных изображениях (T1-ВИ) и, напротив, гиперинтенсивным (повышенным) сигналом на T2-взвешенных изображениях (T2-ВИ). Для перелома на фоне остеопороза характерно сохранение гипоинтенсивного сигнала в обеих используемых последовательностях [27].

Что касается визуальной семиотики очагового поражения при ММ, то на T1-ВИ данные образования характеризуются снижением интенсивности МР-сигнала и могут иметь как четкие, ровные, так и неровные контуры. Аналогично данным компьютерной томографии, в части случаев может визуализироваться специфический паттерн, известный как mini-brain. При применении режимов, направленных на подавление сигнала от жировой ткани, — T2-взвешенных изображений с жироподавлением (T2-ВИ FS) или последовательности STIR (Short Tau Inversion

Recovery) — сигнал от миеломных инфильтратов, напротив, становится значительно более интенсивным по сравнению с неизмененным костным мозгом [12] (рис. 6, 7).



Рис. 6. МРТ позвоночника пациента с множественной миеломой в режимах T1-, T2- и STIR-ВИ [12]

Примечание: В телах позвонков в зоне сканирования определяются множественные мелкие очаги множественной миеломы с неровными четкими контурами, гипоинтенсивные на T1- и гиперинтенсивные на STIR. Также определяется диффузное поражение костного мозга Th1, также гипоинтенсивное на T1- и гиперинтенсивное на STIR.

Fig. 6. MRI of the spine of a patient with MM in the T1-, T2- and STIR-VI mode [12]

Note: The scan reveals multiple small foci of multiple myeloma in the vertebral bodies with irregular, clear borders, hypointense on T1 and hyperintense on STIR. Diffuse Th1 bone marrow lesions are also detected, hypointense on T1 and hyperintense on STIR.

На МР-томограммах, полученных после внутривенного контрастного усиления в T1-взвешенном режиме, характерно выявляется определенная динамика накопления контрастного препарата: наблюдается интенсивное увеличение сигнала в раннюю (артериальную) фазу, за которым следует постепенное снижение его интенсивности в более поздние временные точки. Диффузная резорбция костных трабекул визуализируется в виде специфического неоднородного сигнала, описываемого как паттерн «соль с перцем» [12].

Важным диагностическим аспектом является то, что как компьютерная, так и магнитно-резонансная томография обладают потенциалом для выявления экстраоссальных (внекостных) проявлений заболевания. Подобные изменения могут локализоваться в широком спектре органов и тканей, включая паренхиматозные органы (печень, селезенка, почки), структуры лимфатической системы, органы грудной полости (легкие, плевра), а также серозные оболочки и структуры брюшной полости (твердая мозговая оболочка, брыжейка, брюшина, большой сальник, кишечник) [29, 30].

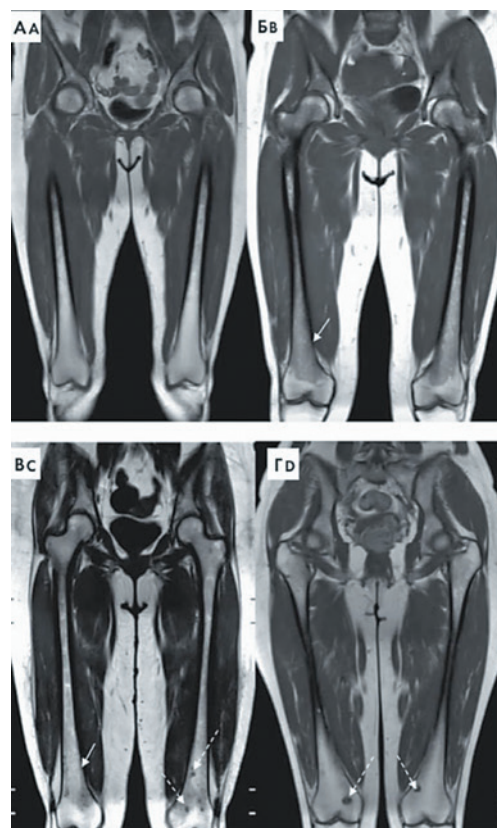


Рис. 7. Иллюстрация паттернов поражения костного мозга при множественной миеломе (T1-ВИ, бедренные кости)

Примечания: А — нормальная структура; Б — диффузная инфильтрация (сплошная стрелка); В — диффузно-очаговая инфильтрация (диффузный компонент — сплошная стрелка, очаги — прерывистая стрелка); Г — очаговая инфильтрация (очаги отмечены прерывистой стрелкой).

Fig. 7. Bone marrow infiltration patterns in MM patients, femur, T1WI

Notes: A — intact bone marrow; B — diffuse bone marrow infiltration (solid arrow); C — diffuse and focal infiltration (diffuse infiltration marked by solid arrow, foci — by dashed arrow); D — focal infiltration (dashed arrow) [28].

Исследования подтверждают, что использование МРТ при ММ демонстрирует наибольшую чувствительность при выявлении ранних повреждений костей и диффузной инфильтрации костного мозга, при разграничении с патологическими и остеопоротическими переломами, а также при выявлении компрессии спинного мозга или других неврологических событиях [23, 31–35].

Остеосцинтиграфия (в контексте метода радиологической диагностики множественной миеломы) не проводится в связи с более низкой чувствительностью (по сравнению с КТ и МРТ) и очаговым характером поражения костей скелета [12].

Однако в остром периоде не МРТ, а остеосцинтиграфия позволяет дифференцировать характер патологического перелома позвонка (остеопорозной или опухолевой природы) [27].

Диагностика литических очагов в костях черепа при ММ с помощью таких методов визуализации, как ПЭТ/КТ и МРТ, уступает по возможностям низкодозной КТ и классической рентгенографии [36].

ДИФфуЗИОННАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕЛА

Использование диффузно-взвешенных изображений (DWI) является одним из ценных и перспективных методик для выявления экстраоссальных изменений [12].

Так как DWI отражает хаотичное броуновское движение молекул воды во внутриклеточном, внеклеточном и внутрисосудистом пространствах, увеличение процента злокачественной инфильтрации плазматическими клетками костного мозга ведет к ограничению движения молекул воды [38].

Показатель интенсивности магнитно-резонансного сигнала, регистрируемый на T2-взвешенных изображениях с подавлением сигнала от жира (T2-ВИ FS) и в последовательностях STIR, имеет тесную корреляционную взаимосвязь с объемом плазматической инфильтрации, поражающей костный мозг. Тем не менее, данный количественный параметр сам по себе является недостаточным критерием для достоверной дифференциальной диагностики между состоянием гиперплазированного или реактивно преобразованного красного костного мозга и непосредственно миеломной инфильтрацией, что представляет собой существенное диагностическое ограничение в определенных клинических ситуациях [37].

Несмотря на то, что данные последовательности используются чаще, диффузионно-взвешенная визуализация является наиболее перспективной последовательностью МРТ для дифференциации симптоматической ММ от МГНЗ и тлеющей миеломы посредством визуальной оценки, а также для качественной оценки активности поражения и ответа на терапию [37].

Значения ADC нормального костного мозга обычно ниже $600\text{--}700\text{ мкм}^2/\text{с}$ (из-за наличия желтого костного мозга у пожилых людей будут снижены значения вследствие жировой дистрофии), тогда как значения ADC жизнеспособной опухоли обычно находятся между 700 и $1400\text{ мкм}^2/\text{с}$ (рис. 8) [23].

При исследовании методом диффузионно-взвешенной визуализации (DWI) очаговые поражения, характерные для множественной миеломы, неизменно демонстрируют феномен истинного ограничения диффузии молекул воды. Данный феномен находит

свое отражение в виде выраженного, стойкого повышения интенсивности МР-сигнала на собственно DWI-изображениях, которое регистрируется при использовании различных значений b-фактора (фактора диффузии). Важным подтверждающим критерием служит последующее построение карт измеряемого коэффициента диффузии (ADC map), на которых зоны соответствующей патологии отображаются в виде участков выраженного гипоинтенсивного сигнала («выпадения»), что количественно подтверждает факт рестрикции диффузии [12].

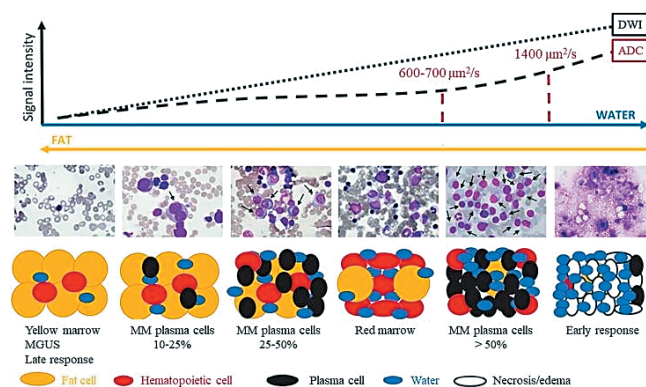


Рис. 8. Связь между значениями ADC, интенсивностью сигнала в последовательностях DWI и плотностью клеток костного мозга в течение заболевания и ответом на терапию

Сокращения: ADC — кажущийся коэффициент диффузии; DWI — диффузионно-взвешенная визуализация; MGUS — моноклональная гаммапатия неопределенного значения; MM — множественная миелома [23, 39, 40].

Fig. 8. Relation between ADC values, signal intensity in DWI sequences and bone marrow cellular density during disease course and response to therapy

Abbreviations: ADC — apparent diffusion coefficient; DWI — diffusion-weighted imaging; MGUS — monoclonal gammopathy of undetermined significance; MM — multiple myeloma [23, 39, 40].

В случаях диффузного характера инфильтрации костного мозга плазматическими клетками, изменения сигнала на нативных T1-взвешенных изображениях (T1-ВИ) могут проявляться минимально, оставаясь изоинтенсивными по отношению к нормальному костному мозгу или мышцам, что существенно затрудняет или делает невозможной их достоверную визуализацию в данном режиме. Однако применение последовательностей, чувствительных к отеку и инфильтрации, — T2-ВИ с подавлением сигнала от жира (T2-ВИ FS) — позволяет значительно улучшить их обнаружение. В этом режиме диффузное поражение проявляется в виде гомогенного или неоднородного

повышения интенсивности МР-сигнала от костного мозга. Ключевым дополнительным диагностическим признаком, как и при очаговой форме, также будет служить выявление характерного ограничения диффузии при проведении DWI-исследования [12].

Клеточность не является основным фактором, влияющим на сигнал изображения DWI-ADC при ММ. Измеряемый коэффициент диффузии уменьшается с гиперклеточностью и увеличивается с гиперваскуляризацией, что соответствует гиперклеточности в костном мозге, пораженном миеломой: конечный эффект заключается в увеличении значения ADC при множе-

ственной миеломе относительно нормального значения. Это объясняет преимущество МРТ с интравоксельным некогерентным движением для диагностики/мониторинга ММ. Использование более низких значений b-фактора обеспечивает лучшее соотношение сигнал/шум, тогда как более высокие значения b-фактора более точны для обнаружения очагов [37] (рис. 9, 10).

Таким образом, диффузионно-взвешенная МРТ всего тела представляет собой современный протокол исследования, измеряющий движение молекул воды внутри ткани, которое обратно коррелирует с ее клеточной плотностью. Использование данной методики

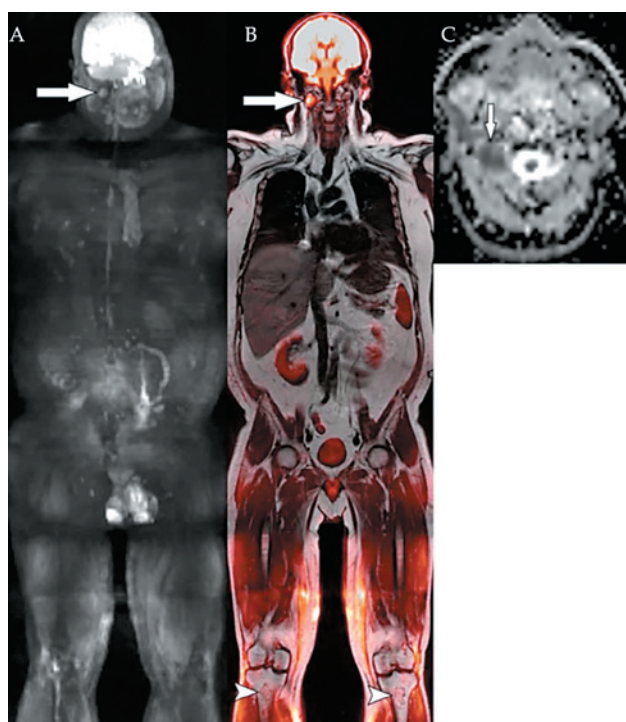


Рис. 9. Мужчина 45 лет с диагностированной низкосекреторной множественной миеломой (ММ) IgG каппа-типа

Примечание: В анамнезе за 3 года до проведения исследования — аутологичная трансплантация гемопоэтических стволовых клеток. За 2 года до визуализации проведена локальная лучевая терапия на тело позвонка L1; в течение последних 6 месяцев пациент получает поддерживающую терапию (карфилзомиб, помалидомид и дексаметазон). При проведении МРТ всего тела (WB-MRI) очаговых поражений костного мозга не выявлено. Однако на коронарной проекции МIP-реконструкции диффузионно-взвешенных изображений (DWI) с высоким b-фактором ($b=800$) (A) визуализируется экстрамедуллярное образование размером 12 мм, расположенное в глубоких отделах околоушной железы справа. На аксиальной карте кажущегося коэффициента диффузии (ADC) (C) образование подтверждает истинное ограничение диффузии (среднее значение $ADC = 0,8 \times 10^{-3} \text{ мм}^2/\text{с}$). Кроме того, отмечаются участки инфаркта костного мозга в проксимальных метафизах большеберцовых костей с обеих сторон (стрелки с наконечниками, (B)) [37].

Fig. 9. A 45-year-old male patient with hyposecretory IgG kappa multiple myeloma (MM) and a history of autologous stem cell transplantation performed 3 years prior to imaging

Note: The patient underwent radiation therapy targeting the L1 vertebral body 2 years ago and has been on maintenance therapy (carfilzomib, pomalidomide, and dexamethasone) for the past 6 months. Whole-body MRI (WB-MRI) did not reveal any osseous lesions. However, a coronal maximum intensity projection (MIP) image from high b-value ($b=800$) diffusion-weighted imaging (DWI) (A) demonstrated a 12 mm extramedullary lesion located deep to the right parotid gland. An axial apparent diffusion coefficient (ADC) map (C) confirmed true diffusion restriction (mean ADC value of $0.8 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$). Additionally, areas of bone marrow infarction in the bilateral proximal tibial metaphyses are noted (arrowheads, (B)) [37].

рекомендуют руководящие принципы MY-RADS с целью стандартизации получения и интерпретации изображений при диагностике множественной миеломы [23].

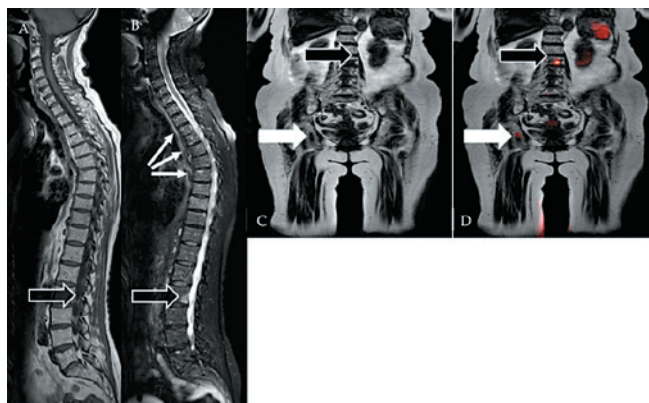


Рис. 10. Результаты МРТ тела у пациентки 75 лет с рецидивирующим течением заболевания (сочетание активных и посттерапевтических изменений)

Примечания: А — на сагиттальном T1-взвешенном изображении (T1-WI) визуализируется очаговое поражение костного мозга (черная стрелка) в задненижнем отделе тела позвонка L2; В — сагиттальное STIR-изображение позволяет выявить указанный очаг в L2 (черная стрелка), а также демонстрирует несколько дополнительных патологических очагов (тонкие белые стрелки), которые не были отчетливо видны на T1-WI; С — коронарное T1-взвешенное изображение, полученное по методике Dixon в режиме подавления сигнала от воды (Dixon Fat), подтверждает наличие очага в теле L2 (черная стрелка) и выявляет еще один очаг в правой седалищной кости (белая стрелка); D — совмещенное изображение, объединяющее данные диффузионно-взвешенной визуализации с высоким b-фактором ($b=800$) и Dixon-последовательности (fused b800-Dixon), демонстрирует выраженное повышение сигнала в проекции очага L2 (черная стрелка) и менее интенсивное повышение сигнала от очага в седалищной кости (белая стрелка) [37].

Fig. 10. Whole-body MRI (WB-MRI) findings in a 75-year-old female patient with recurrent disease (mixed active and treated lesions)

Notes: A — sagittal T1-weighted image (T1-WI) reveals a focal bone marrow lesion (black arrow) in the posteroinferior portion of the L2 vertebral body; B — sagittal STIR image depicts the L2 lesion (black arrow) and demonstrates several additional sites of disease (thin white arrows) that were not conspicuous on the T1-WI; C — coronal T1-weighted Dixon Fat image confirms the L2 lesion (black arrow) and shows another lesion within the right ischium (white arrow); D — a fused image combining high b-value ($b=800$) diffusion-weighted data and Dixon sequence (fused b800-Dixon) exhibits marked hyperintensity at the L2 lesion site (black arrow) and a milder signal increase at the ischial lesion (white arrow) [37].

Данный протокол используется для сканирования всего тела от теменной области до коленных суставов с использованием как обычных импульсных последовательностей (T1-ВИ, T2-ВИ и STIR-ВИ с толщиной среза 4–5 мм), так и специальных (DWI-ВИ и T1 Dixon-ВИ для подавления жира), без необходимости использования контрастных веществ и продолжительностью 40–60 мин. [23].

Несмотря на существующие ограничения, связанные с доступностью методики диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии всего тела (DW-MPT, DWI WB-MRI), ее диагностический потенциал оценивается как исключительно высокий и перспективный. Согласно ряду исследований, чувствительность данного метода в детекции костных литических очагов и диффузной инфильтрации костного мозга может превосходить аналогичный показатель позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, с применением 18-ФДГ (ПЭТ/КТ с 18-ФДГ). Более того, DW-MPT всего тела демонстрирует значительные возможности в области мониторинга и оценки ответа на проводимую противоопухолевую терапию [23].

Эффективность использования диффузионно-взвешенной МРТ всего тела подтверждается не только на этапе первичной диагностики множественной миеломы, но и в рамках контроля эффективности лечения, в частности, после выполнения аутологичной трансплантации гемопоэтических стволовых клеток (ауто-ТГСК). Наблюдаемая динамика изменений количественных диффузионных параметров тесно коррелирует с регрессом заболевания. Так, уменьшение количества и общего объема остеолитических очагов в костях статистически значимо ассоциировано со снижением значений кажущегося коэффициента диффузии (ИКД, ADC) в этих зонах. Следовательно, снижение показателя ADC в очагах костно-мозговой инфильтрации, наблюдаемое после проведения ауто-ТГСК, может рассматриваться в качестве важного дополнительного количественного критерия положительного терапевтического ответа, наряду с традиционно оцениваемыми параметрами — регрессией в количестве и размерах самих очаговых образований [28].

РЕКОМЕНДУЕМЫЙ АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИКИ

Руководящие принципы IMWG, вследствие того что WBLDCT доказала значительно более высокую чувствительность по сравнению с традиционным обследованием скелета при обнаружении остеолитических поражений, рекомендуют использовать ее в качестве метода визуализации первого выбора для диагностики миелома-ассоциированного заболевания

костей (MBD) наравне с ФДГ-ПЭТ/КТ. Если результаты WBLDCT (или КТ-части ПЭТ/КТ, поскольку только повышенного поглощения недостаточно для диагностики ММ) отрицательны и отсутствуют другие признаки, характерные для миеломы, рекомендуется использовать МРТ всего тела (WB-MRI). В качестве альтернативы, если WB-MRI недоступна, пациентам следует пройти МРТ позвоночника и таза (аксиальная МРТ осевого скелета, AS-MRI) (рис. 11) [23].

ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕЩЕННОЙ ПЭТ/МРТ С 18-ФДГ

Совмещенная ПЭТ/МРТ с широким спектром (с использованием 18-ФДГ в качестве радиофармпрепарата) является гибридным методом визуализации, который в настоящее время изучается при ММ. К основным его преимуществам относится возможность одновременной оценки морфологии, васкуляризации,

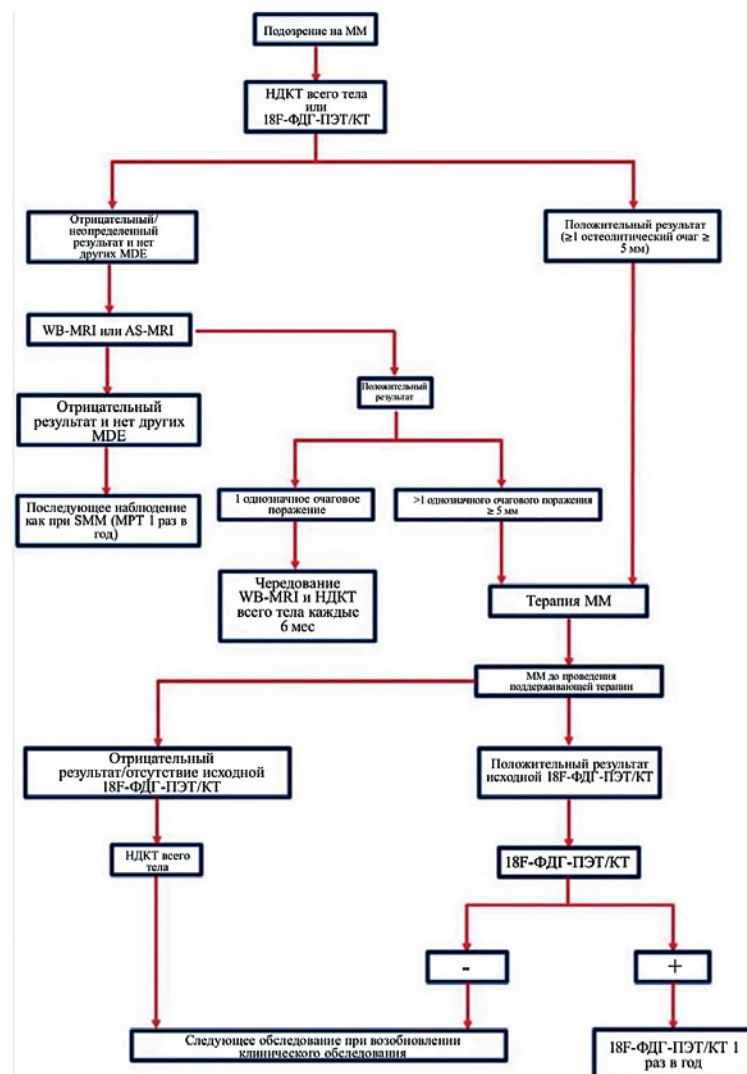


Рис. 11. Алгоритм визуализации для пациентов с подозрением на ВДММ и для оценки ответа на терапию

Сокращения: ВДММ — впервые диагностированная множественная миелома; НДКТ всего тела — низкодозная компьютерная томография всего тела; 18F-ФДГ-ПЭТ/КТ — позитронно-эмиссионная томография/компьютерная томография с 18F-фтордезоксиглюкозой; WB-MRI — магнитно-резонансная томография всего тела; AS-MRI — аксиальная МРТ скелета; MDE — определяющее миелому событие; SMM — тлеющая ММ [21].

Fig. 11. Imaging algorithm for patients with suspected NDMM and for response evaluation during therapy

Abbreviations: NDMM — newly diagnosed multiple myeloma; WBLDCT — whole-body low dose computed tomography; 18F-FDG-PET/CT — 18F-fluorodeoxyglucose-positron emission tomography/computed tomography; WB-MRI — whole-body magnetic resonance imaging; AS-MRI — axial skeleton MRI; MDE — myeloma defining event; SMM — smoldering MM [21].

плотности клеток костного мозга и метаболической активности. Однако он дорогостоящий и требует двойной экспертизы.

Публикаций о его применении у пациентов с множественными миеломами немного [23].

ВОЗМОЖНОСТИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Анализ поражений костей, обнаруженных с помощью КТ и МРТ, может быть выполнен с использованием искусственного интеллекта и радиомики. Радиомика — сложный, основанный на количественных признаках инструмент для анализа изображений. На сегодняшний день она является количественным многообещающим методом, цель которого состоит в улучшении терапии заболевания за счет усиления прогностических возможностей медицинской визуализации [41].

Количественные характеристики извлекаются из данных изображений (полученных с помощью методов лучевой диагностики) и затем используются в предиктивном моделировании с помощью вычислительных алгоритмов, основанных на искусственном интеллекте.

Таким образом, радиомика может улучшить лечебные и прогностические возможности медицинской визуализации, особенно в онкологии [42].

Недавнее применение радиомики в вопросах диагностики ММ позволило улучшить рентгенологическую оценку очаговых и диффузных изменений при КТ. Точность рентгенологической оценки по сравнению с контрольным стандартом была ниже (64 %), чем точность при использовании радиомики (79 %) [41].

Модели на основе машинного обучения дали удовлетворительный результат при проведении дифференциальной диагностики поражений костей при ММ и метастатическом поражении позвоночника, с применением МР-изображений. Использование радиомики с ПЭТ/КТ при ММ помогает в разработке прогностических моделей, предсказывающих исход у лиц с впервые выявленным заболеванием и показанием к трансплантации [41]. Внедрение подобных прогностических моделей в клиническую практику способно существенно повысить точность стратификации пациентов по рискам и, как следствие, открыть новые возможности для персонализированного подхода к терапии. Реализация данного подхода позволяет не только усовершенствовать долгосрочное прогнозирование течения заболевания, но и заложить основу для разработки индивидуализированных лечебных стратегий, обеспечивающих направленное (таргетное) вмешательство в соответствии с выявленными прогностическими маркерами [22].

Согласно литературе, данный метод может использоваться для корреляции признаков с клиническим и гематологическим ответом у пациентов с ММ, находящихся на терапии [43].

На данный момент не существует единого метода выбора области интереса (ROI) или объема интереса (VOI) и сегментации изображений [42].

WB-DWI доказало свою эффективность в выявлении остеолитических очагов ММ, однако большой объем данных визуализации затрудняет процесс анализа. Использование полуавтоматических алгоритмов сегментации поражений ММ на WB-DWI МР-изображениях дает одинаково воспроизводимые результаты по сравнению с сегментацией, выполняемой рентгенологами вручную [22]. Данный метод может помочь в более точной оценке опухолевой нагрузки и, следовательно, улучшить оценку ответа на лечение [22].

Машинное обучение тесно связано с рабочим процессом радиомики. У пациентов с ММ радиомика в сочетании с машинным обучением может использоваться для прогнозирования клинических исходов на основе характеристик, полученных с помощью МРТ, КТ или ПЭТ/КТ-изображений. Автоматизированный цифровой анализ изображений в сочетании с машинным обучением демонстрирует возможность неинвазивного прогнозирования инфильтрации плазматическими клетками [42].

Исследование Bauer и соавторов показало, что автоматизированные модели машинного обучения, основанные на радиомических характеристиках, извлекаемых из МР-данных, обладают значимой прогностической ценностью в отношении терапии при ММ. Полученные ими данные свидетельствуют о возможности внедрения неинвазивного прогноза до начала терапии, что может улучшить процесс принятия клинических решений [44].

Исследование Suwei Liu и коллег представило перспективу развития радиомики при ММ. Исследование было направлено на разработку и валидацию клинической радиомической модели номограмм, основанной на T2-ВИ FS МР-последовательности, способной оценивать цитогенетический статус при ММ с последующим анализом его прогностического значения для общей выживаемости [45]. Авторами были созданы три модели, и наилучшей показала себя рентгенологическая модель, которая сочетает в себе рентгенологические характеристики с возрастом, показателями лактатдегидрогеназы, альбумина и бета2-микроглобулина сыворотки крови. Данная комбинированная модель стратифицировала пациентов с ММ на группу с HRC-статусом и группу без HRC-статуса на основе общей выживаемости, и ее прогностические показатели были идентичны цитогенетическому статусу [45].

Подобное комбинированное моделирование номограмм может служить эффективным и удобным дополнительным инструментом для оценки цитогенетического статуса ММ до начала лечения с помощью неинвазивных методов [45].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа современной литературы следует признать, что в настоящее время отсутствует универсальный золотой стандарт медицинской визуализации проявлений ММ.

В диагностике заболевания каждый метод визуализации играет определенную роль. Поэтому врачи должны обладать всесторонним пониманием преимуществ и недостатков, связанных с применением каждого метода визуализации [22].

Методика низкодозной компьютерной томографии открывает перспективы для высокоточной визуализации единичных деструктивных очагов малых и средних размеров. Ее высокое пространственное разрешение обеспечивает возможность детекции остеолитических образований, размеры которых не превышают 5 мм. Данная способность является критически важной для осуществления ранней верификации симптоматической формы множественной миеломы, своевременного выявления патологических переломов и, как следствие, назначения адекватной специфической терапии в оптимальные сроки.

Важным дополнительным преимуществом метода служит возможность проведения трехмерной (3D) реконструкции исследуемых анатомических зон. Эта функция способствует более детальному и наглядному анализу масштабов и степени распространения остеодеструктивного процесса, что имеет непосредственное значение для определения дальнейшей лечебной тактики и планирования потенциальных интервенций.

Безусловными диагностическими преимуществами низкодозной КТ, подтверждающими ее ценность в диагностике множественной миеломы, выступают следующие характеристики: высокая скорость получения и интерпретации результатов исследования; возможность одномоментной оценки распространенности повреждений костной ткани на обширных анатомических участках; способность к быстрой идентификации нестабильных участков позвоночного столба; высокая чувствительность в выявлении костной деструкции при одновременном обеспечении минимальной (сниженной) лучевой нагрузки на пациента [6].

Наибольшей диагностической эффективности можно добиться при использовании МРТ всего тела в сочетании с низкодозной КТ черепа [36].

МРТ обладает высокой чувствительностью при выявлении поражений позвоночника и их

осложнений, в то время как ПЭТ/КТ с 18-ФДГ оказывает значительное влияние на прогноз и считается предпочтительным методом визуализации для мониторинга метаболического ответа на терапию [22]. WB-DWI МРТ может помочь в дифференциации доброкачественных образований, особенно гемопозитического костного мозга, и оценить клеточность ткани с высокой чувствительностью, оспаривая доминирование ПЭТ/КТ с 18-ФДГ в оценке ответа на терапию [22].

Потенциал медицинской количественной визуализации при множественной миеломе в значительной степени недооценен: искусственный интеллект, радиомика и новые количественные методы оценки КТ и МРТ способны по-другому использовать визуализацию как диагностический метод; внедрение новых количественных оценок и биомаркеров для расчета прогноза множественной миеломы (которые, возможно, превосходят существующие методы стадирования), а также для создания новых надежных стандартов прогнозирования и мониторинга заболевания является возможностью для дальнейших исследований в области визуализации множественной миеломы [41].

Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциального конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

Соответствие нормам этики / Compliance with ethical principles

Исследование одобрено локальным этическим комитетом. Пациентами подписано информированное согласие на публикацию данных, полученных в результате исследований. / The study was approved by the Local Ethics Committee. All patients signed informed consent for the publication of the research data

Авторы заявляют об отсутствии использования генеративного искусственного интеллекта. / The authors declare no use of Generative AI in the preparation of this manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCE

1. Менделеева Л. П., Соловьев М. В., Рехтина И. Г. и др. Клинические рекомендации Министерства здравоохранения Российской Федерации «Множественная миелома»; 2024. 217 с.
Mendeleva LP, Soloviev MV, Rekhtina IG, et al. Clinical guidelines of the Ministry of Health of the Russian Federation "Multiple Myeloma"; 2024. 217 p. (In Russ.)
2. Solly S. Remarks on the pathology of mollities ossium; with cases. *Medical and Chirurgical Transactions of London*. 1844;27:435–464. <https://doi.org/10.1177/095952874402700129>

3. Махамдалиева Г. З. Множественная миелома (обзор литературы). *Журнал теоретической и клинической медицины*. 2021;5:101–105.
Makhamadalieva GZ. Multiple myeloma (literature review). *Journal of Theoretical and Clinical Medicine*. 2021;5:101–105. (In Russ.)
4. Rustizky J. Multiple myeloma. *Deutsche Zeitschrift für Chirurgie*. 1873;3(1–2):162–172. <https://doi.org/10.1007/BF02911073>
5. Weber FP. Multiple myeloma (myelomatosis) with Bence-Jones protein in the urine (myelopathic albumosuria of Bradshaw, Kahler's disease). *J. Pathol.* 1904;9:172–191. <https://doi.org/10.1002/path.1700090205>
6. Данилина А. М., Менделеева Л. П., Костина И. Э. и др. Низкодозная компьютерная томография всего скелета у первичных пациентов со множественной миеломой. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ». Реабилитация, Врач и Здоровье*. 2023;2(13):62–69. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.2.CLIN.5>
7. Danilina AM, Mendeleeva LP, Kostina IE, et al. Whole-body low-dose computed tomography in primary patients with multiple myeloma. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ". Rehabilitation, Doctor and Health*. 2023;13(2):62–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2023.2.CLIN.5>
8. International Myeloma Working Group. Criteria for the classification of monoclonal gammopathies, multiple myeloma and related disorders: a report of the International Myeloma Working Group. *Br J Haematol*. 2003;5(121):749–757.
9. Козич Ж. М., Мартинков В. Н., Климович Н. Н. и др. Новые подходы в диагностике и терапии множественной миеломы (обзор литературы). *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности*. 2024;(2):23–28. [https://doi.org/10.58708/2074-2088.2024-2\(32\)-23-28](https://doi.org/10.58708/2074-2088.2024-2(32)-23-28)
10. Kozich ZhM, Martinkov VN, Klimovich NN, et al. New approaches in the diagnosis and treatment of multiple myeloma (review). *Medical and Biological Problems of Life Activity*. 2024;(2):23–28. (In Russ.) [https://doi.org/10.58708/2074-2088.2024-2\(32\)-23-28](https://doi.org/10.58708/2074-2088.2024-2(32)-23-28)
11. Rajkumar SV. Multiple myeloma: 2016 update on diagnosis, risk-stratification, and management. *American journal of hematology*. 2016;7(91):719–734.
12. Бессмельцев С. С. Множественная миелома: диагностика и лечение (часть 1). *Вестник гематологии*. 2022;2(18):4–26.
13. Bessmeltsev SS. Multiple myeloma: diagnosis and therapy (part 1). *Russian Research Institute of Hematology and Transfusiology*. 2022, 2(18):4–26. (In Russ.)
14. Rajkumar SV, Dimopoulos MA, Palumbo A, et al. International Myeloma Working Group updated criteria for the diagnosis of multiple myeloma. *Lancet Oncol*. 2014;15(12):e538–e548.
15. Яриков А. В., Бояршинов А. А., Лобанов И. А. и др. Множественная миелома: эпидемиология, этиология, диагностика и современные аспекты хирургического лечения. *Поволжский онкологический вестник*. 2021;2(12):53–64. <https://elibrary.ru/ZWJOMQ>
16. Yarikov AV, Boyarshinov AA, Lobanov IA, et al. Multiple myeloma: epidemiology, etiology, diagnosis and modern aspects of surgical treatment. *Oncology bulletin of the volga region*. 2021;2(12):53–64. (In Russ.) <https://elibrary.ru/ZWJOMQ>
17. Нагайцева А. А., Жариков Ю. О. Мини-инвазивные методики лечения компрессионных переломов позвоночника при миеломной болезни (обзор). *Медицинский академический журнал*. 2019;1(19):29–34. <https://doi.org/10.17816/MAJ19129-34>
18. Nagajtseva AA, Zharikov YuO. Minimally invasive treatment of spinal compression fractures in multiple myeloma (review). *Medical academic journal*. 2019;1(19):29–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/MAJ19129-34>
19. Джинджихадзе Р. С., Древал О. Н., Лазарев В. А., Ветрилэ С. Т. Хирургическое лечение миеломного поражения позвоночника и спинного мозга. *Нейрохирургия*. 2007;3:72–79.
20. Dzhindzhikhadze RS, Dreval ON, Lazarev VA, Vetrile ST. Surgical treatment of myelomatous lesions of the spine and spinal cord. *Russian journal of neurosurgery*. 2007;3:72–79. (In Russ.)
21. Стамо А. П., Григорьева В. Н. Клинические особенности болевого синдрома у пациентов с множественной миеломой. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2016;10(116):11–15. <https://doi.org/10.17116/jnevro201611610111-15>
22. Stamo AP, Grigor'eva VN. Clinical characteristics of pain syndrome in patients with multiple myeloma. *S.S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*. 2016;116(10):11–15. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/jnevro201611610111-15>
23. Есенина Т. В., Малиновская Е. А., Асташева Т. А. и др. Особенности диагностики и лечения солитарной плазмодитомы. *Амурский медицинский журнал*. 2014;1(5):102–105. <https://elibrary.ru/UMZBTR>
24. Esenina TV, Malinowskay EA, Astasheva TA, et al. Diagnosis and treatment of solitary plasmacytoma. *Amur Medical Journal*. 2014;1(5):102–105. (In Russ.) <https://elibrary.ru/UMZBTR>
25. Regelink JC, Minnema MC, Terpos E, et al. Comparison of modern and conventional imaging techniques in establishing multiple myeloma-related bone disease: a systematic review. *Br J Haematol*. 2013;162:50–61.
26. Mahnke AH, Wildberger JE, Gehbauer G, et al. Multi-detector CT of the spine in multiple myeloma: comparison with MR imaging and radiography. *AJR*. 2002;178:1429–1436.
27. Horger M, Claussen CD, Bross-Bach U, et al. Whole-body low-dose multidetector row-CT in the diagnosis of multiple myeloma: an alternative to conventional radiography. *European Journal of Radiology*. 2005;54:289–297.
28. Horger M, Pereira P, Claussen CD, et al. Hyperattenuating bone marrow abnormalities in myeloma patients using whole-body non-enhanced low-dose MDCT: correlation with haematological parameters. *British Journal of Radiology*. 2008;81(965):386–396.
29. Hillengass J, Usmani S, Rajkumar SV, et al. International myeloma working group consensus recommendations on

imaging in monoclonal plasma cell disorders. *Lancet Oncol.* 2019;20(6):e302–e312.

22. Rodríguez-Laval V, Lumbreras-Fernández B, Agudo-Bueno B, Gómez-León N. Imaging of multiple myeloma: present and future. *J. Clin. Med.* 2024;13:264. <https://doi.org/10.3390/jcm13010264>

23. Talarico M, Barbato S, Cattabriga A, et al. Diagnostic innovations: advances in imaging techniques for diagnosis and follow-up of multiple myeloma. *J Bone Oncol.* 2025;51:100669. <https://doi.org/10.1016/j.jbo.2025.100669>

24. Nanni C, Deroose CM, Balogova S, et al. EANM guidelines on the use of [18F] FDG PET/CT in diagnosis, staging, prognostication, therapy assessment, and restaging of plasma cell disorders. *Eur J Nucl Med Mol Imaging.* 2024;52:171–192.

25. Ulaner GA, Sobol NB, O'Donoghue JA, et al. CD38-targeted immuno-PET of multiple myeloma: from xenograft models to first-in-human imaging. *Radiology.* 2020;295(3):606–615. <https://doi.org/10.1148/radiol.2020192621>

26. Луцик Н. С., Менделеева Л. П., Яцык Г. А. Информативность магнитно-резонансной томографии всего тела с диффузионно-взвешенными изображениями для выявления инфильтрации костного мозга у больных множественной миеломой (обзор литературы). *Онкогематология.* 2022;1(17):87–94. <https://doi.org/10.17650/1818-8346-2022-17-1-87-94>

Lutsik NS, Mendeleva LP, Yatsik GA. Informative value of whole-body magnetic resonance imaging with diffusion-weighted images for the detection of bone marrow infiltration in patients with multiple myeloma (literature review). *Oncohematology.* 2022;17(1):87–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.17650/1818-8346-2022-17-1-87-94>

27. Закондырин Д. Е., Гринь А. А. Опухоли позвоночника: обзор литературы. *Нейрохирургия.* 2022;24(2):94–104. <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2022-24-2-94-104>

Zakondyrin DE, Grin AA. Spinal tumors: literature review. *Russian journal of neurosurgery.* 2022;24(2):94–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.17650/1683-3295-2022-24-2-94-104>

28. Луцик Н. С., Менделеева Л. П., Соловьев М. В. и др. Возможности магнитно-резонансной томографии всего тела для диагностики и контроля лечения больных множественной миеломой. *Гематология и трансфузиология.* 2020;65(4):431–443. <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2020-65-4-431-443>

Lutsik NS, Mendeleva LP, Solovev MV, et al. Whole-body magnetic resonance imaging for diagnosis and treatment monitoring in multiple myeloma. *Russian journal of hematology and transfusiology.* 2020;65(4):431–443. (In Russ.) <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2020-65-4-431-443>

29. Маркина Ю. Ю. Поражения скелета при миеломной болезни и их лучевая диагностика. *Сибирский медицинский журнал.* 2008;3–2(23):19–23.

Markina YuYu. The skeleton injuries in multiple myeloma disease and their radial diagnosis. *Sibirskij Medicinskij Zhurnal.* 2008;3–2(23):19–23. (In Russ.)

30. Маркина Ю. Ю. Современные аспекты лучевой диагностики поражений скелета при миеломной болезни. *Сибирское медицинское обозрение.* 2008;6(54):91–94.

Markina YuYu. Modern aspects of medical imaging of bone lesions in multiple myeloma. *Siberian Medical Review.* 2008;6(54):91–94. (In Russ.)

31. Zamagni E, Nanni C, Patriarca F, et al. A prospective comparison of 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography-computed tomography, magnetic resonance imaging and whole-body planar radiographs in the assessment of bone disease in newly diagnosed multiple myeloma. *Haematologica.* 2007;92(1):50–55. <https://doi.org/10.3324/haematol.10554>

32. Spinnato P, Bazzocchi A, Brioli A, et al. Contrast enhanced MRI and 18F-FDG PET-CT in the assessment of multiple myeloma: a comparison of results in different phases of the disease. *Eur. J. Radiol.* 2012;81(12):4013–4018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrad.2012.06.028>

33. Walker R, Barlogie B, Haessler J, et al. Magnetic resonance imaging in multiple myeloma: diagnostic and clinical implications. *J. Clin. Oncol.* 2007;25(9):1121–1128. <https://doi.org/10.1200/JCO.2006.08.5803>

34. Regelink JC, Minnema MC, Terpos E, et al. Comparison of modern and conventional imaging techniques in establishing multiple myeloma-related bone disease: a systematic review. *Br. J. Haematol.* 2013;162(1):50–61. <https://doi.org/10.1111/bjh.12346>

35. Fonti R, Salvatore B, Quarantelli M, et al. 18F-FDG PET/CT, 99mTc-MIBI, and MRI in evaluation of patients with multiple myeloma. *J. Nucl. Med.* 2008;49(2):195–200. <https://doi.org/10.2967/jnumed.107.045641>

36. Rocha TG, de Oliveira CB, de Magalhães Filho RJP, et al. Comparison between computed tomography and magnetic resonance imaging in detecting multiple myeloma lesions in the skull: a systematic review. *Clin Transl Imaging.* 2024;12:177–185.

37. Torkian P, Azadbakht J, Bonaffini PA, et al. Advanced imaging in multiple myeloma: new frontiers for MRI. *Diagnostics.* 2022;12:2182. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12092182>

38. Dutoit JC, Vanderkerken MA, Anthonissen J, et al. The diagnostic value of SE MRI and DWI of the spine in patients with monoclonal gammopathy of undetermined significance, smouldering myeloma and multiple myeloma. *Eur Radiol.* 2014.

39. Dutoit JC, Verstraete KL. MRI in multiple myeloma: a pictorial review of diagnostic and post-treatment findings. *Insights Imaging.* 2016;7(4):553–569. <https://doi.org/10.1007/s13244-016-0492-7>

40. Ormond Filho AG, Carneiro BC, Pastore D, et al. Whole-Body Imaging of Multiple Myeloma: Diagnostic Criteria. *Radiographics.* 2019;39(4):1077–1097. <https://doi.org/10.1148/rgr.2019180096>

41. Tagliafico AS. Imaging in multiple myeloma: Computed tomography or magnetic resonance imaging? *World J Radiol.* 2021;13(7):223–226.

42. Michalska-Foryszewska A, Rogowska A, Kwiatkowska-Miernik A, et al. Role of Imaging in Multiple Myeloma: A Potential Opportunity for Quantitative Imaging and Radiomics?

Cancers (Basel). 2024;16(23):4099. <https://doi.org/10.3390/cancers16234099>

43. Ekert K, Hinterleitner C, Baumgartner K, et al. Extended texture analysis of non-enhanced whole-body MRI image data for response assessment in multiple myeloma patients undergoing systemic therapy. *Cancers (Basel)*. 2020;12 <https://doi.org/10.3390/cancers12030761>

44. Bauer F, Hajiyanni M, Weinhold N, et al. Automated radiomics model for prediction of therapy response and minimal residual disease from baseline MRI in multiple myeloma. *Sci Rep*. 2025;15:35400. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13165-2>

45. Suwei Liu, Haojie Pan, Shenglin Li, et al. Radiomic nomogram for predicting high-risk cytogenetic status in multiple myeloma based on fat-suppressed T2-weight magnetic resonance imaging. *J bone Oncol*. 2024;47:100617.

Поступила в редакцию / Received: 13.01.2026

Принята к публикации / Accepted: 02.02.2026

Информация об авторах:

Климович Анастасия Михайловна — ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия, vargina.anast@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4957-7695>;

Труфанов Геннадий Евгеньевич — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия, trufanovge@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1611-5000>;

Салогуб Галина Николаевна — доктор медицинских наук, профессор кафедры факультетской терапии с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия, salogub@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8951-1680>.

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Authors information:

Anastasiya M. Klimovich, Resident of the Department of Radiation Diagnostics and medical imaging with the clinic, V. A. Almazov NMRC, vargina.anast@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4957-7695>;

Gennady E. Trufanov, MD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with clinic, V. A. Almazov NMRC, trufanovge@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1611-5000>;

Galina N. Salogub, MD, PhD, DSc, Professor, Head of the Department of Faculty Therapy with clinic, V. A. Almazov NMRC, salogub@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8951-1680>.

Contribution of the authors:

The authors contributed equally to this article.