



МРТ-СЕМИОТИКА ДИСБАРИЧЕСКОГО ОСТЕОНЕКРОЗА У ВОДОЛАЗОВ

В.В. Димиев, И.С. Железняк, Е.Н. Адаева

Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, ул. Академика Лебедева, д. 6, лит. Ж, г. Санкт-Петербург, 194044, Россия

Резюме. *Актуальность.* Дисбарический остеонекроз – патология костей скелета, развивающаяся на фоне декомпрессионных нарушений у водолазов, подводников, дайверов и кессонных рабочих. Наибольшая частота встречаемости данной патологии наблюдается у дайверов-рыбаков – 50-77%; у коммерческих водолазов она составляет 16-55%, у кессонных рабочих – 25-35%, а у военных водолазов этот показатель существенно ниже – 2-5%. Основными патогенетическими причинами развития дисбарического остеонекроза являются газовая эмболия кровеносных сосудов микроциркуляторного русла пузырьками свободного газа (азота), а также механическое повреждение ими эндотелия капилляров и костного мозга, что приводит к их воспалению, отёку, гиперкоагуляции и компартмент-синдрому. Это вызывает нарушение внутрикостного кровотока, развитие ишемии и запуск некротических процессов в тканях кости. *Цель исследования:* изучить МР-семиотику дисбарического остеонекроза у водолазов. *Материалы и методы.* Исследования проводили на высокопольных магнитно-резонансных томографах с индукцией магнитного поля 1,5 Тл «Ingenia» (Philips) и «Magnetom Symphony» (Siemens) по стандартным протоколам с получением T1, T2 и PD-взвешенных изображений, а также изображений с использованием эффекта подавления сигнала от жировой ткани (FS). Было проведено МРТ-сканирование наиболее часто поражаемых, по данным литературных источников, анатомических областей – плечевые, тазобедренные и коленные суставы с охватом прилегающих к суставам частей диафизов. Оценивались локализация, распространение и тип специфических патологических изменений, характерных для дисбарического остеонекроза. Всего было обследовано 54 водолаза, которые были разделены на три группы: 1. Водолазы, выполняющие глубоководные водолазные спуски на глубину более 60 м (имеющие дополнительные водолазные квалификации водолаз-глубоководник и акванавт). 2. Водолазы, выполняющие водолазные спуски на глубину до 60 м. 3. Водолазы, выполняющие водолазные спуски в условиях нормобарии (имеющие дополнительную водолазную квалификацию гидронавт). *Результаты.* Проведённые МР-исследования показали, что дисбарический остеонекроз чаще поражает водолазов-глубоководников и акванавтов, а наличие в анамнезе эпизодов острой декомпрессионной болезни повышает риск его появления. Также подтверждены опубликованные в литературе данные о преимущественной локализации поражений: в головке плечевой кости, метаэпифизах и диафизе бедренной кости. *Заключение.* На основании результатов исследования можно утверждать, что для водолазов группы риска (осуществляющих глубоководные водолазные спуски и имеющих в анамнезе эпизоды острой декомпрессионной болезни) показан регулярный МРТ-мониторинг костей скелета.

Ключевые слова: дисбарический остеонекроз [D010020 (Osteonecrosis)]; магнитно-резонансная томография [D008279]; водолазы [специфический термин профессии]; декомпрессионная болезнь [D003665]; семиотика [D020874]; остеонекроз [D010020]; глубоководные погружения [D004242]; газовая эмболия [D004618]; гипербарическая медицина [D006992]; декомпрессия [D003664].

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Соответствие нормам этики. Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо.

Для цитирования: Димиев В.В., Железняк И.С., Адаева Е.Н. МРТ-семиотика дисбарического остеонекроза у водолазов. *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2025;15(3):216-225. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.3.MIM.2>

MRI-SEMIOTICS OF DYSBARIC OSTEONECROSIS IN DIVERS

Vil' V. Dimiev, Igor' S. Zheleznyak, Ekaterina N. Adaeva

S.M. Kirov Military Medical Academy, 6, Academician Lebedev St., lit. Zh, St. Petersburg, 194044, Russia

Abstract. Relevance. Dysbaric osteonecrosis is a pathology of the skeletal bones that develops against the background of decompression disorders in divers, submariners, divers and caisson workers. The highest frequency of this pathology is observed in divers-fishermen (50–77%); in commercial divers it is 16–55%, in caisson workers – 25–35%, and in military divers this figure is significantly lower – 2–5%. The main pathogenetic causes of the development of dysbaric osteonecrosis are gas embolism of blood vessels of the microcirculatory bed by bubbles of free gas (nitrogen), as well as mechanical damage to the endothelium of capillaries and bone marrow, which leads to their inflammation, edema, hypercoagulation and compartment syndrome. This causes a violation of intraosseous blood flow, the development of ischemia and the initiation of necrotic processes in bone tissues. *The aim of the study:* to study the MR semiotics of dysbaric osteonecrosis in divers. *Materials and methods.* The studies were conducted on high-field magnetic resonance tomographs with a magnetic field induction of 1.5 T "Ingenia" (Philips) and "Magnetom Symphony" (Siemens) according to standard protocols with obtaining T1, T2 and PD-weighted images, as well as images using the effect of signal suppression from fat tissue (FS). MRI scanning was performed of the most frequently affected, according to literary sources, anatomical areas – shoulder, hip and knee joints, covering the parts of the diaphyses adjacent to the joints. The localization, distribution and type of specific pathological changes characteristic of dysbaric osteonecrosis were assessed. A total of 54 divers were examined, who were divided into 3 groups: 1. Divers performing deep-sea diving descents of more than 60 m (having additional diving qualifications of deep-sea diver and aquanaut). 2. Divers performing diving descents up to 60 m. 3. Divers performing diving descents in normobaric conditions (having an additional diving qualification of hydronaut). *Results.* The conducted MRI studies have shown that dysbaric osteonecrosis most often affects deep-sea divers and aquanauts, and the presence of episodes of acute decompression sickness in the anamnesis increases the risk of its occurrence. The published data on the predominant localization of lesions: in the head of the humerus, metaepiphyses and diaphysis of the femur have also been confirmed. *Conclusion.* Based on the results of the study, it can be stated that regular MRI monitoring of the skeletal bones is indicated for divers at risk (performing deep-sea diving descents and having episodes of acute decompression sickness in the anamnesis).

Keywords: dysbaric osteonecrosis [D010020 (Osteonecrosis)]; magnetic resonance Imaging [D008279]; divers / [специфический термин профессии]; decompression sickness [D003665]; semiotics [D020874]; osteonecrosis [D010020]; deep-sea diving [D004242]; air embolism [D004618]; hyperbaric medicine [D006992]; decompression [D003664].

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. The study was conducted without sponsorship.

Compliance with ethical principles. The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary.

Cite as: Dimiev V.V., Zheleznyak I.S., Adaeva E.N. MRI-semiotics of dysbaric osteonecrosis in divers. *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health.* 2025;15(3):216–225. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.3.MIM.2>

Введение

Дисбарический остеонекроз – немикробное поражение тканей кости, возникающее в результате нарушения кровоснабжения и сопровождающееся их омертвением, а также частичным или полным разрушением. Патологические изменения в костях при этом заболевании развиваются на фоне изменения давления внешней среды и встречаются у водолазов, дайверов, рабочих, дышащих сжатым воздухом или искусственной газовой смесью, а также при аварийных ситуациях на подводных лодках и нарушениях в работе барокамер и барокомплексов [1, 2].

На основании результатов научных исследований можно утверждать, что дисбарический остеонекроз представляет собой терминальную стадию развития любых дисбарогенных изменений в костях и является одним из специфических заболеваний водолазов, которое в перспективе существенно влияет на трудоспособность и общее качество жизни.

По данным литературных источников встречаемость дисбарического остеонекроза в различных странах сильно варьирует. Это связано, в первую очередь, с различными диагностическими возможностями медицины, использованием небезопасных методов выполнения водолазных спусков и отличающимися социально-экономическими условиями.

Так, например, дайверы-рыбаки, собирающие с донного грунта различных моллюсков, морских ежей и губок, выполняют спуски под воду с использованием вентилируемого водолазного снаряжения, когда постоянная подача воздуха по шлангу с поверхности позволяет неограниченное время находится под водой. В связи с этим погоня за коммерческой выгодой часто приводит к превышению безопасного времени пребывания на глубине, количества повторных водолазных спусков и к несоблюдению существующих оптимальных режимов декомпрессии. В целом дисбарический остеонекроз чаще всего встречается у дайверов-рыбаков и составляет от 50% до 77%, у коммерческих водолазов – от 16% до 55%, у кессонных рабочих – от 25% до 35%, среди военных водолазов западных стран – от 2% до 5%, что в целом коррелирует с имеющимися статистическими данными других литературных источников [3–6].

Наиболее частая локализация дисбарического остеонекроза – проксимальные метаэпифизы плечевых костей и метаэпифизы бедренных костей, кроме того, он может поражать диафизы бедренной и проксимальные метаэпифизы большеберцовой кости. Нередко очаги имеют мультифокальное распределение [4, 7].

Большинство исследователей выделяют декомпрессионное газообразование в организме водола-

за в качестве ключевого патогенетического фактора дисбарического остеонекроза. Согласно данным литературных источников, декомпрессионное газообразование вызывает газовую эмболизацию внутрикостных кровеносных сосудов пузырьками азота, что приводит к формированию зон ишемии костной ткани. Также повреждение эндотелиальных клеток кровеносных сосудов пузырьками свободного газа провоцирует развитие воспалительного процесса и активацию процессов гиперкоагуляции с последующим тромбозом внутрикостных сосудов, что приводит к образованию новых очагов ишемии в структурных элементах кости [5, 8].

Некоторые учёные в своих исследованиях указывают на то, что образование пузырьков свободного газа внутри костного мозга вызывает его механическое повреждение, сопровождающееся развитием отёка. Возникающая при этом компрессия венозной синусоидальной системы приводит к снижению скорости кровотока, увеличению вязкости крови, формированию венозного стаза, увеличению периферического сосудистого сопротивления и, как следствие, усугублению отёка и ишемии. Это приводит к дальнейшему росту внутрикостного давления, создавая условия для развития компартмент-синдрома и формирования порочного круга, усиливающего ишемические процессы в тканях. Помимо этого, повреждение адипоцитов кости пузырьками свободного газа может вызвать жировую эмболию внутрикостных сосудов [9–12].

Магнитно-резонансная томография (МРТ), являющаяся неинвазивным и высокоспецифичным методом лучевой диагностики, при наличии соответствующих анамнестических данных и клинической симптоматики рассматривается как диагностический метод выбора для выявления в костях зон ишемии и участков остеонекроза. Анализ данных научных исследований свидетельствует о том, что магнитно-резонансная томография превосходит другие лучевые методы диагностики по информативности в выявлении дисбарического остеонекроза и признана «золотым стандартом» его визуализации на ранних стадиях. Согласно имеющимся данным, частота выявления дисбарического остеонекроза при использовании МРТ достигает 97,7%, а чувствительность метода в диагностике ранних стадий заболевания составляет 94,7%. Данный метод обеспечивает точное определение локализации, размеров и структурных особенностей костных дефектов, а также позволяет анализировать функциональные характеристики и визуализировать результаты в формате трёхмерной модели. Кроме того, применение МРТ позволяет выявить в костях области остеосклероза и остеопороза, кисты, в том числе расположенные субкортикально, а также участки жировой дегенерации и отёка костного мозга, ко-

торый визуализируется как зона сниженного МР-сигнала на T1-взвешенных изображениях и повышенного сигнала на T2-взвешенных последовательностях [13–15].

Цель исследования: изучить МР-семиотику дисбарического остеонекроза у водолазов.

Материалы и методы

Исследование проводили на высокопольных магнитно-резонансных томографах «Ingenia» (Philips, Нидерланды) и Magnetom Symphony (Siemens, Германия) с индукцией магнитного поля 1,5 Тесла. При выполнении МРТ коленных суставов с захватом дистальной трети диафиза бедренной кости и проксимальной части диафиза большеберцовой кости, а также плечевых суставов с захватом верхней трети диафиза плечевой кости использовали соответствующие специальные радиочастотные катушки для суставов. МР-сканирование тазобедренных суставов проводили с применением поверхностной катушки для тела.

Для проведения МРТ-исследований суставов обследуемый располагался на столе томографа в горизонтальном положении (лёжа на спине), центрация с помощью лазерного визира осуществлялась по изоцентрам радиочастотных катушек. МР-томограммы получали по стандартным протоколам в корональной, сагиттальной, аксиальной, косо-корональной и косо-сагиттальной плоскостях с толщиной среза 4–10 мм. Для визуализации патологических изменений использовали режимы МР-сканирования с получением T1-взвешенных, T2-взвешенных и PD-взвешенных изображений, а также импульсные последовательности с использованием эффекта подавления сигнала от жировой ткани (PD-FS-BI).

Всего были проанализированы результаты МР-исследований 54 водолазов с различными дополнительными водолазными квалификациями. Из них 22 водолаза выполняли глубоководные водолазные спуски на глубины более 60 метров (водолазы-глубоководники (акванавты)), 19 – водолазные спуски на глубины до 60 метров и 13 – спуски в условиях нормального давления (гидронавты).

Индивидуальное количество водолазных спусков составило от 1 до 20 и более. Непрерывный профессиональный стаж – от 5 до 30 лет, от 500 до 13000 спусковых часов. В группе водолазов-глубоководников (акванавтов) 14 человек (64%) имеют в анамнезе минимум один эпизод декомпрессионной болезни лёгкой или средней степеней тяжести.

Оценку структуры костных тканей осуществляли с использованием T1-взвешенных изображений (T1-BI), позволяющих выявлять зоны остеосклероза и трабе-

кулярного отёка костного мозга, которые, в отличие от жировой ткани, имеющей гиперинтенсивный МР-сигнал, выглядят более тёмными (гипоинтенсивный МР-сигнал). Компактное вещество кости имеет гипоинтенсивный сигнал на МР-томограммах всех импульсных последовательностей. На T2-взвешенных изображениях вода даёт гиперинтенсивный сигнал, а жировая ткань костного мозга демонстрирует промежуточную интенсивность МР-сигнала. Изображения, взвешенные по протонной плотности с подавлением сигнала от жировой ткани (PD-FS-BI), показали высокую эффективность в оценке состояния костного мозга и суставного хряща, а также являются информативными для диагностики других мягкотканых структур. Применение методики подавления МР-сигнала от жировой ткани обеспечивало точную интерпретацию признаков патологии костного мозга. На PD-BI с жироподавлением костный мозг и жировая ткань характеризовались МР-сигналом низкой интенсивности, что позволяло дифференцировать их от свободной жидкости, отёка и других патологических изменений, имеющих гиперинтенсивный сигнал.

Данные о исследуемых, результаты клинических и лучевых исследований вносились в специально разработанную базу данных.

Обработка данных производилась на персональном компьютере на базе операционной системы Windows 11 с использованием пакета программного обеспечения Microsoft Office 2016 и специальной программы постпроцессорной обработки получаемых МРТ-изображений на ПК – RadiAnt DICOM Viewer.

Результаты и обсуждение

В настоящее время общепризнанной считается классификация дисбарического остеонекроза Британского медицинского научно-исследовательского совета по декомпрессионной болезни (Medical Research Council Decompression Sickness Panel in Britain, MRC DSPB) (табл. 1). В её основе лежат данные рентгенологических исследований пациентов, страдающих этой патологией и имеющие соответствующие изменения в костях различной локализации. В связи с этим при интерпретации полученных результатов МРТ-исследований водолазов мы использовали данную классификацию только для описания локализации специфических патологических изменений [3, 16].

По результатам проведённых МРТ-исследований у водолазов-глубоководников выявлены множественные скрытые и клинически значимые патологические изменения костей. Были визуализированы костные кисты, очаги дисбарического остеонекроза и участки остеосклероза, как возможный исход ранее перенесённого заболевания. Патологические изменения дисбарогенного характера располагались как юкстаартикулярно (А-поражения), так и на отдалении от суставных поверхностей (В-поражения).

Учитывая то, что костные кисты и изолированные участки остеосклероза могут возникать по различным причинам и не являются специфичными признаками дисбарической природы, мы провели оценку патологических изменений костей, характерных только для дисбарического остеонекроза с указанием их локализации в соответствии с классификацией MRC DSPB (табл. 2).

Таблица 1. Классификация дисбарического остеонекроза (MRC DSPB)

Table 1. Classification of dysbaric osteonecrosis (MRC DSPB)

Шифр по МКБ	Юкстаартикулярные поражения эпифиза	
A1	Плотные участки с интактным суставным кортексом	
A2	Сферические сегментные затемнения	
A3	Линейные затемнения	
A4	Разрушение костной структуры	
	a	Субкортикальная полоска просветления
	b	Разрушение (коллапс) суставного кортекса
	c	Секвестрация (части) кортекса
A5	Вторичный дегенеративный остеоартрит	
Поражение метафиза, диафиза		
B1	Плотные участки (без костных островков)	
B2	Неравномерно кальцифицированные участки	
B3	Участки просветления и кисты	
B4	Кортикальное утолщение	

Таблица 2. Патологические изменения в костях и их локализация, выявленные у водолазов по данным МРТ-исследований

Table 2. Pathological changes in bones and their localization, identified in divers according to MRI studies

Анатомическая область	ДОН, А-поражение	ДОН, В-поражение	Костные кисты	Остеосклероз
Проксимальный метаэпифиз плечевой кости	5	1	27	6
Проксимальный метаэпифиз бедренной кости	3	–	10	4
Дистальный метадиафиз бедренной кости	–	5	–	3
Дистальный метаэпифиз бедренной кости	2	–	7	7
Проксимальный метаэпифиз большеберцовой кости	–	3	2	5
Всего	10	9	46	25

На полученных МРТ-томограммах юкстаартикулярно расположенный дисбарический остеонекроз (А-поражение) характеризуется следующими патогномоничными признаками: наличие чётко очерченного некротического очага в субхондральном отделе кости с вариабельной интенсивностью МР-сигнала, серповидная гипоинтенсивная полоса по периферии очага на T1-взвешенных изображениях и визуализация на PD-FS-ВИ характерного симптома «двойной линии», где внутренняя полоса представлена грануляционной тканью и имеет гиперинтенсивный МР-сигнал, а наружная полоса – гипоинтенсивная за счёт остеосклероза на PD-FS-ВИ.

В-поражения (дисбарический остеонекроз в области метадиафизов и диафизов) демонстрируют характерную МРТ-картину, отражающую их патоморфологические особенности. Центральная зона поражений этой локализации может иметь участки с гиперинтенсивным МР-сигналом на T1-ВИ и T2-взвешенных изображениях, что соответствует некротизированной жировой ткани. На T1-взвешенных изображениях зона некроза окружена характерным гипоинтенсивным ободком остеосклероза в виде линии серпигинозного характера, морфологически представляющим реактивное костеобразование. На полученных МР-томограммах между центральной некротической зоной и остеосклеротическим ободком визуализируется чётко дифференцируемые линейные участки фиброваскулярной ткани, проявляющейся гипоинтенсивным МР-сигналом на T1-взвешенных изображениях и гиперинтенсивным МР-сигналом на T2- и PD-FS-взвешенных изображениях.

При обоих типах поражений расположенные по периферии очага остеонекроза отделы костного мозга характеризуются повышенной интенсивностью МР-сигнала на T2-ВИ и PD-FS-взвешенных изображениях, что патогенетически связано с развитием перифокального отёка костного мозга.

Морфологическая картина дисбарического остеонекроза значительно варьирует и имеет различные конфигурации, что определяется как объёмом поражения, так и его топографо-анатомической локализацией.

На основании полученных данных можно утверждать, что наиболее частая локализация юкстаартикулярного дисбарического остеонекроза (А-поражение) – проксимальный метаэпифиз плечевой кости ($n = 5$). Кроме того, А-поражения были выявлены в проксимальном метаэпифизе бедренной кости ($n = 3$) и дистальном метаэпифизе бедренной кости ($n = 2$). В-поражения чаще определялись в дистальном метадиафизе бедренной кости ($n = 5$), чем в проксимальном метадиафизе большеберцовой кости ($n = 3$) и проксимальном метаэпифизе плечевой кости ($n = 3$). Костные кисты в подавляющем большинстве были выявлены в области проксимального метаэпифиза плечевой кости ($n = 27$). Основная локализация определяемых участков остеосклероза – метаэпифизы костей нижних конечностей. Полученные методом магнитно-резонансной томографии результаты коррелируют с имеющимися данными мировой научной литературы по локализации дисбарического остеонекроза.

Также мы провели сравнение количества выявленных случаев дисбарического остеонекроза у водолазов в зависимости от рабочих глубин водолазных спусков и наличия в анамнезе острой декомпрессионной болезни (табл. 3).

По данным таблицы 3 видно, что дисбарический остеонекроз был выявлен в подавляющем большинстве случаев у водолазов, выполнявших глубоководные водолазные спуски на глубины более 60 м (водолазы-глубоководники (акванавты)) и имеющих в анамнезе острую декомпрессионную болезнь.

Таблица 3. Встречаемость дисбарического остеонекроза у водолазов в зависимости от глубины водолазных спусков и наличия в анамнезе острой декомпрессионной болезни

Table 3. Incidence of dysbaric osteonecrosis in divers depending on the depth of diving and the presence of a history of acute decompression sickness

Тип патологического изменения	Количество выявленных патологических изменений						
	Всего у водолазов ($n = 54$)	Водолазные спуски на глубину > 60 м ($n = 22$)		Водолазные спуски на глубину до 60 м ($n = 19$)		Гидронавты ($n = 13$)	
		с ДКБ ($n = 14$)	без ДКБ ($n = 8$)	с ДКБ ($n = 2$)	без ДКБ ($n = 17$)	с ДКБ ($n = 0$)	без ДКБ ($n = 13$)
ДОН, А-поражения	10	9	-	1	-	-	-
ДОН, В-поражения	9	9	-	-	-	-	-
Всего	19	18	-	1	-	-	-

Характерные патологические изменения костей дисбарического генеза различной локализации проиллюстрированы результатами МРТ-исследований приведенных ниже.

На рисунке 1 показаны характерные изменения в головке правой плечевой кости водолаза, имеющего 500 часов пребывания под водой, максимальную глубину погружений до 20 м в воде и до 100 м в условиях барокамеры, а также 1 эпизод острой де-

компрессионной болезни в анамнезе. При проведении МРТ-исследования правого плечевого сустава в области головки правой плечевой кости были визуализированы патологические изменения, связанные с суставной поверхностью и имеющие характерные признаки субхондрального дисбарического остеонекроза (А-поражение).

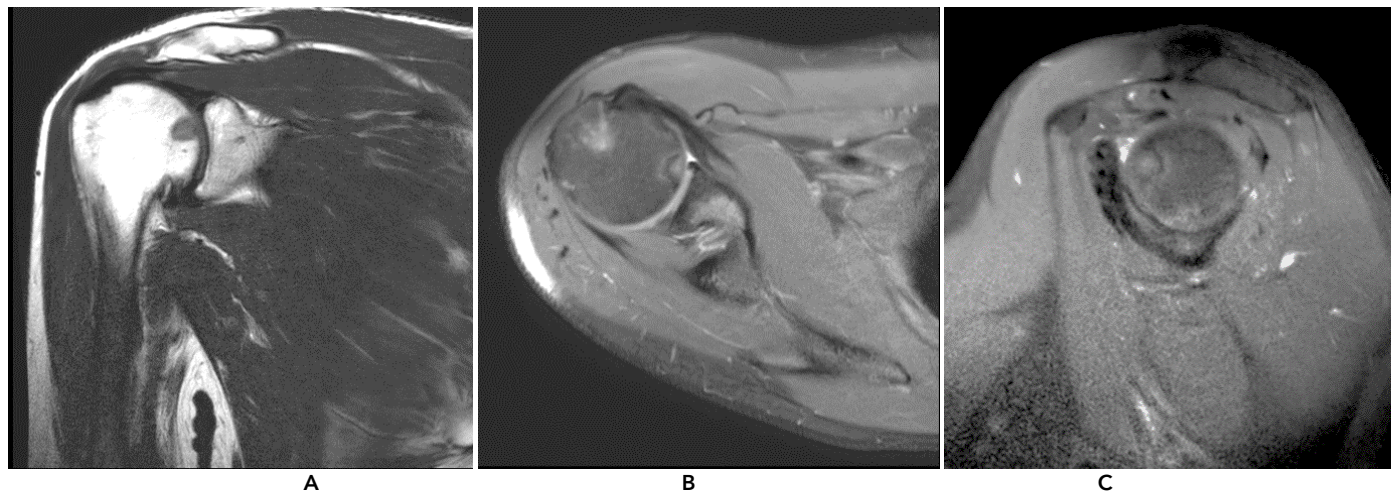


Рисунок 1. МР-томограммы правого плечевого сустава: **А.** T1-ВИ в косо-корональной плоскости. Определяется область некроза, связанная с суставной поверхностью плечевой кости и имеющая специфический остеосклеротический ободок по периферии с гипоинтенсивным МР-сигналом. **В.** PD-FS-ВИ в аксиальной плоскости. Визуализируется характерный симптом «двойной линии» по периферии очага остеонекроза с перифокальным трабекулярным отёком костного мозга, имеющим гиперинтенсивный МР-сигнал. **С.** PD-FS-ВИ в косо-сагиттальной плоскости

Figure 1. MR images of the right shoulder joint: **A.** T1-WI in oblique coronal plane. An area of necrosis is identified, connected to the articular surface of the humerus and having a specific osteosclerotic rim at the periphery with hypointense MR signal. **B.** PD-FS-WI in axial plane. The characteristic "double line" sign is visualized at the periphery of the osteonecrosis focus with perifocal trabecular bone marrow edema showing hyperintense MR signal. **C.** PD-FS-WI in oblique sagittal plane

На рисунке 2 представлены результаты МРТ-исследования левого плечевого сустава водолаза-глубоководника (акванавта). Водолаз имеет 10 000 часов пребывания под водой, несколько водолазных спусков методом длительного пребывания под повышенным давлением, максимальная глубина погружения в условиях гидробарокомплекса составляет 500 м, 1 эпизод острой декомпрессионной болезни в анамнезе. На изображениях в проксимальном метафизе левой плечевой кости определяется зона дисбарического остеонекроза с характерным симптомом «двойной линии», склеротическим ободком и перифокальным трабекулярным отёком (В-поражение).

Кроме того, на МР-томограммах у данного водолаза в дистальной трети диафиза левой бедренной

кости также определяются патологические изменения, соответствующие дисбарическому остеонекрозу. Данные изменения характеризуются наличием типичного склерозированного ободка по периферии очага, чётко визуализируемого на T1-взвешенных изображениях. Зона некроза демонстрирует более выраженную визуализацию на PD-FS-взвешенных изображениях, где она представлена вариабельной интенсивностью МР-сигнала из-за чередования фиброзно-жировой и грануляционной ткани, а также наличием специфического симптома «двойной линии» по периферии очага (В-поражение) (рис. 3).

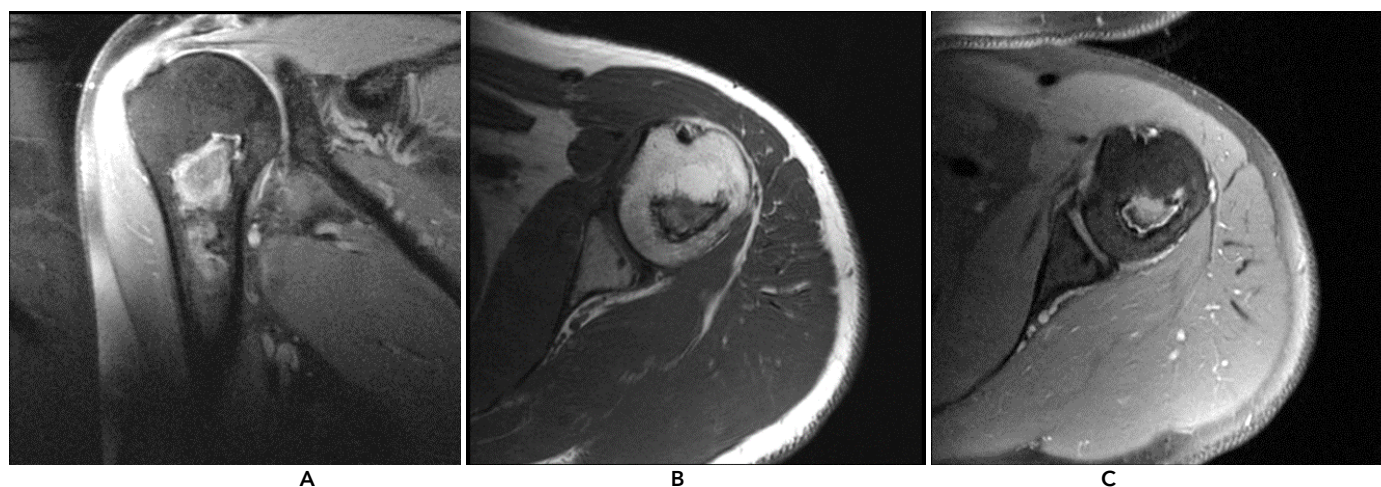


Рисунок 2. МР-томограммы левого плечевого сустава. **А.** PD-FS-ВИ в косо-корональной плоскости. В области метафиза визуализируется МР-признаки, характерные для дисбарического остеонекроза: специфичный симптом «двойной линии» по периферии очага с различной интенсивностью МР-сигнала, а также перифокальный трабекулярный отёк костного мозга, дающий гиперинтенсивный сигнал. **В.** T1-ВИ в аксиальной плоскости. Перифокальный трабекулярный отёк костного мозга, очаг остеонекроза и склеротическим имеют гипоинтенсивный МР-сигнал. **С.** PD-FS-ВИ в аксиальной плоскости

Figure 2. MR images of the left shoulder joint: **A.** PD-FS-WI in oblique coronal plane. In the metaphyseal region, MR features characteristic of dysbaric osteonecrosis are visualized: specific "double line" sign at the periphery of the focus with variable MR signal intensity, as well as perifocal trabecular bone marrow edema showing hyperintense signal. **B.** T1-WI in axial plane. Perifocal trabecular bone marrow edema, osteonecrosis focus and sclerotic rim show hypointense MR signal. **C.** PD-FS-WI in axial plane



Рисунок 3. МР-томограммы левого коленного сустава: **А.** T1-ВИ в сагиттальной плоскости. **В.** T1-ВИ в сагиттальной плоскости. **С.** PD-FS-ВИ в корональной плоскости

Figure 3. MR images of the left knee joint: **A.** T1-WI in sagittal plane. **B.** T1-WI in sagittal plane. **C.** PD-FS-WI in coronal plane

На МР-томограммах правого коленного сустава у водолаза-глубоководника, имеющего в анамнезе около 5000 часов пребывания под водой с максимальной глубиной водолазного спуска до 300 м и несколькими эпизодами острой декомпрессионной болезни в анамнезе, в области дистального метадиафиза бедренной кости визуализируется патологическое образование неправильной геометрической формы (рис. 4). Патологические изменения имеют патогномоничные для дисбарического остеонекроза МР-признаки: гипоинтенсивный МР-сигнал от всей площади очага с наличием склеротического

ободка по периферии на T1-ВИ, а также симптом «двойной линии» и перифокальный трабекулярный отёк костного мозга в виде линейных участков с гиперинтенсивным МР-сигналом (В-поражение).

На рисунке 5 представлены результаты МР-сканирования тазобедренных суставов у водолаза-глубоководника (акванавта). В анамнезе максимальная глубина погружений до 450 м, 5000 часов водолазных работ, выполнение водолазных спусков методом длительного пребывания под повышенным давлением и несколько эпизодов острой декомпрессионной болезни.

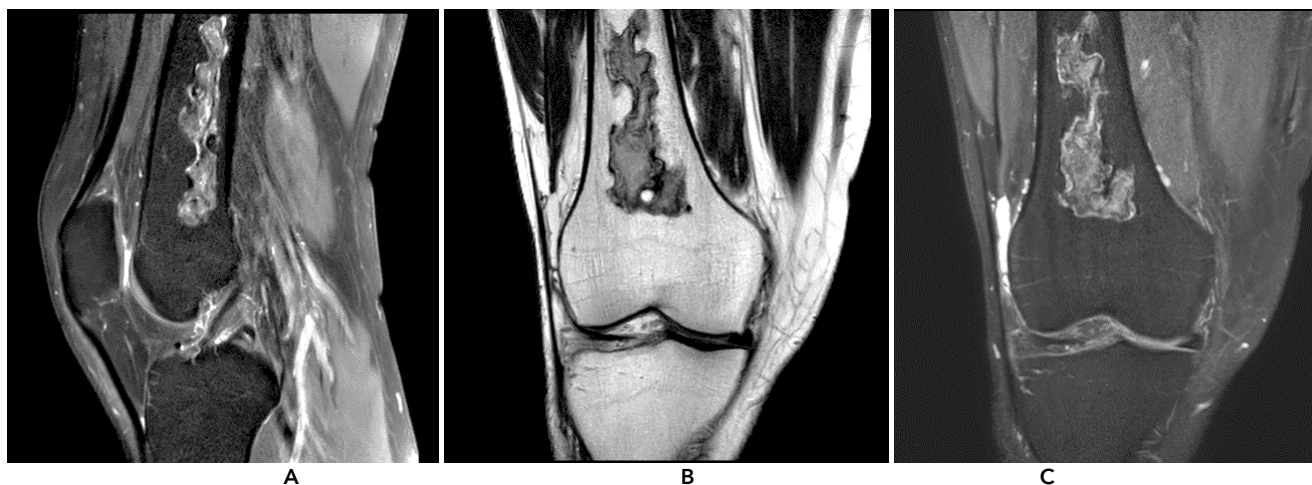


Рисунок 4. МР-томограммы правого коленного сустава: **A.** PD-FS-BI в корональной плоскости. **B.** T1-BI в корональной плоскости. **C.** PD-FS-BI в сагиттальной плоскости

Figure 4. MR images of the right knee joint: **A.** PD-FS-WI in coronal plane. **B.** T1-WI in coronal plane. **C.** PD-FS-WI in sagittal plane

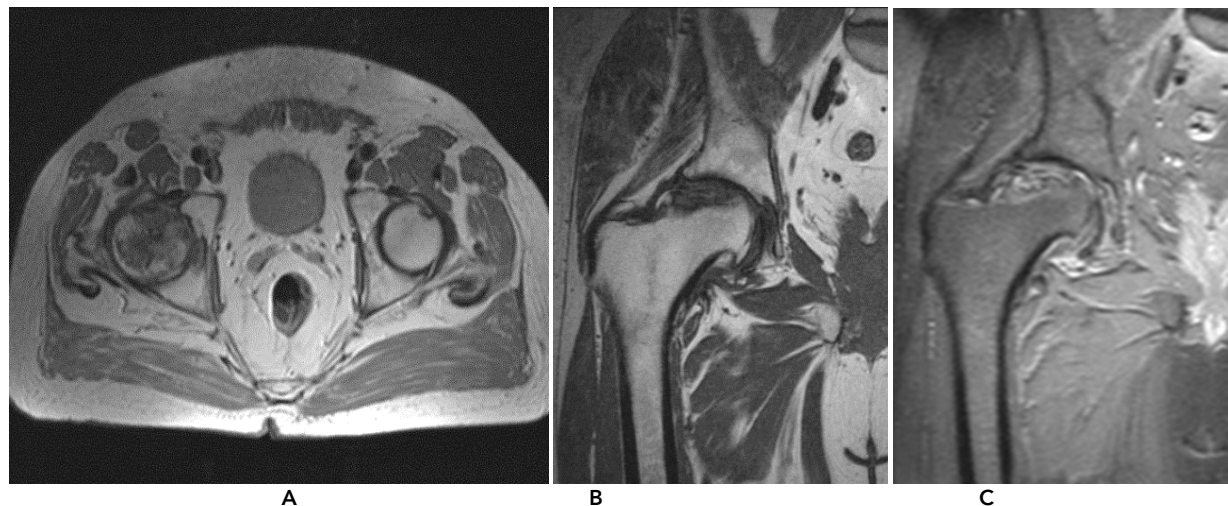


Рисунок 5. МР-томограммы тазобедренных суставов: **A.** В аксиальной плоскости на T1-BI в правой головке бедренной кости определяется зона дисбарического остеонекроза, охватывающая всю ширину суставной поверхности (A-поражение). **B.** T1-BI в корональной плоскости. **C.** PD-FS-BI в корональной плоскости

Figure 5. MR images of the hip joints: **A.** In axial plane on T1-WI, a zone of dysbaric osteonecrosis is identified in the right femoral head, encompassing the entire width of the articular surface (A-lesion). **B.** T1-WI in coronal plane. **C.** PD-FS-WI in coronal plane

На МР-томограммах всех импульсных последовательностей определяется деформация формы головки правой бедренной кости и уплощение её верхнего края в результате разрушения костных трабекул и субхондральной костной ткани, что является осложнением юкстаартикулярно расположенного дисбарического остеонекроза. На T1-BI в области эпифиза визуализируется зона дисбарического остеонекроза с гипоинтенсивным МР-сигналом и ободком остеосклероза по периферии. На PD-FS-взвешенных изображениях визуализируется костное ложе с различной интенсивностью МР-сигнала и характерной «двойной линией» по периферии, а также ободок перифокального трабекулярного отёка костного мозга, имеющего гиперинтенсивный МР-сигнал.

Заключение

По результатам выполненных МРТ-исследований у водолазов-глубинников были обнаружены множественные специфичные изменения костей дисбарического характера. Обнаруженные патологические изменения костей в виде дисбарического остеонекроза по локализации коррелирует с данными литературных научных источников: чаще всего они визуализировались в проксимальных метаэпифизах плечевой кости и головках бедренных костей.

Полученные данные исследований показывают, что среди обследованных водолазов дисбарический остеонекроз чаще встречается у водолазов, выполнявших водолазные спуски на глубины более 60 метров (водолазы-глубоководники, акванавты), в то время как у всех обследованных гидронавтов (водолазов, выполняющих подводные спуски в

условиях нормобарии) не было выявлено характерных патологических изменений. Кроме того, результаты МР-исследований подтверждают имеющиеся в литературных источниках данные о том, что наличие в анамнезе острой декомпрессионной болезни значительно повышает риск развития дисбарического остеонекроза. Отмеченное выше указывает на необходимость выполнять водолазам, относящимся к группе риска (осуществляющим глубоководные водолазные спуски (более 60 м) и имеющим в анамнезе эпизоды острой декомпрессионной болезни), регулярные обследования костно-суставной системы методом МРТ.

Выявленные у водолазов на МР-томограммах очаги дисбарического остеонекроза характеризуются значительным морфологическим разнообразием и имеют различную конфигурацию: линейную, округлую, овальную, а также неправильную геомет-

рическую. Патологические изменения в виде некротизированной, фиброзно-жировой и грануляционной ткани в полостях деструкции, наружной линии остеосклероза по периферии очага остеонекроза серпигинозного характера, а также перифокального отёка костного мозга, не могут быть выявлены с помощью рентгенологических методов лучевой диагностики. Таким образом, требуется разработка новой классификации дисбарических изменений костей на основе результатов МРТ.

Магнитно-резонансная томография позволяет детально оценить локализацию, форму, степень выраженности и распространения патологического процесса, что даёт возможность подобрать оптимальный метод лечения (консервативная терапия или выполнение хирургического вмешательства), а также провести прогностическую оценку развития осложнений.

Литература [References]

- 1 Киреева Е.Б., Чумаков А.В., Агафонов П.В., Можина М.Н. Нарушения опорно-двигательного аппарата у водолазного состава военно-морского флота. *Вестник терапевта*. 2024;64(3):37-45. Kireeva E.B., Chumakov A.V., Agafonov P.V., Mozhina M.N. Musculoskeletal disorders at diving staff of the navy. *Therapist's Bulletin*. 2024;64(3):37-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.31550/2712-8601-VT-2024-3-5>
- 2 Sharareh B., Schwarzkopf R. Dysbaric Osteonecrosis: A Literature Review of Pathophysiology, Clinical Presentation, and Management. *Clinical Journal of Sport Medicine*. 2015;(25):158. <https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000093>
- 3 Крюков Е.В., Киреева Е.Б., Чумаков А.В. и др. Современные диагностические подходы к специфическим костно-суставным изменениям у водолазного состава ВМФ: ретроспективное исследование. *Морская медицина*. 2023;9(4):51-62. Krukov E. V., Kireeva E. B., Chumakov A.V., et al. Modern diagnostic approaches to osteoarticular manifestations in navy diving personnel: retrospective study. *Marine Medicine*. 2023;9(4):51-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.22328/2413-5747-2023-9-4-51-62>
- 4 Popa D., Medak A., Chin W., et al. Dysbaric osteonecrosis (DON) among the artisanal diving fishermen of Yucatan, Mexico. *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2020;50(4):391-398. <https://doi.org/10.28920/dhm50.4.391-398>
- 5 Uguen M., Pougnet R., Uguen A., et al. Dysbaric osteonecrosis among professional divers: A literature review. *Undersea & Hyperbaric Medical Society*. 2014;41(6):581-589.
- 6 Bolte H., Koch A., Tetzlaff K., et al. Detection of dysbaric osteonecrosis in military divers using magnetic resonance imaging. *European Radiology*. 2005;15(2):368-375. <https://doi.org/10.1007/s00330-004-2452-8>
- 7 Shinoda S., Hasegawa Y., Kawasaki S., et al. Magnetic resonance imaging of osteonecrosis in divers: comparison with plain radiographs. *Skeletal Radiology*. 1997;26(6):354-359.
- 8 Arieli R. Gas micronuclei underlying decompression bubbles may explain the influence of oxygen enriched gases during decompression on bubble formation and endothelial function in self-contained underwater breathing apparatus diving. *Croatian Medical Journal*. 2019;60(4):388. <https://doi.org/10.3325/cmj.2019.60.388>
- 9 Бялик В.Е., Макаров М.А., Бялик Е.И., и др. Аvascularный некроз костной ткани: определение, эпидемиология, виды, факторы риска, патогенез заболевания. Аналитический обзор литературы. *Научно-практическая ревматология*. 2023;61(2):220-235. Byalik V.E., Makarov M.A., Byalik E.I., et al. Avascular necrosis of bone tissue: Definition, epidemiology, types, risk factors, pathogenesis of the disease. Analytical review of the literature. *Nauchno-prakticheskaya revmatologia*. 2023;61(2):220-235 (In Russ.) <https://doi.org/10.47360/1995-4484-2023-220-235>
- 10 Gemp E., Louge P., Maistre S. Predictive factors of dysbaric osteonecrosis following musculoskeletal decompression sickness in recreational SCUBA divers. *Joint Bone Spine*. 2016;83(3):357-358. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2015.03.010>
- 11 Мясников А.А., Ефиценко Е.В., Зверев Д.П., и др. Хроническая декомпрессионная болезнь и ее диагностика. *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2018;20(4):26-31. Myasnikov A.A., Eficenko E.V., Zverev D.P., et al. Chronic decompression sickness and its diagnosis. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2018;20(4):26-31. (In Russ.)
- 12 Tsung-Tai L., Cheng-Chuan H., Yi-Chih H., et al. Utility of magnetic resonance spectroscopy and diffusion-weighted imaging for detecting changes in the femoral head in divers with hip pain at risk for dysbaric osteonecrosis. *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. 2022;12(1):43-52. <https://doi.org/10.21037/qims-21-148>
- 13 Zhang Y., Cao X., Li X., et al. Accuracy of MRI diagnosis of early osteonecrosis of the femoral head: a meta-analysis and systematic review. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. 2018;13(1):167-174. <https://doi.org/10.1186/s13018-018-0836-8>
- 14 X. Hernigou P., Hernigou J., Scarlat M. Shoulder osteonecrosis: pathogenesis, causes, clinical evaluation, imaging, and classification. *Orthopaedic Surgery*. 2020;5(12):1340-1349. <https://doi.org/10.1111/os.12788>
- 15 Guzman R.A., Maruyama M., Moeinzadeh S., et al. The effect of genetically modified platelet-derived growth factor-BB over-expressing mesenchymal stromal cells during core decompression for steroid-associated osteonecrosis of the femoral head in rabbits. *Stem Cell Research and Therapy*. 2021;12:503. <https://doi.org/10.1186/s13287-021-02572-7>
- 16 Coleman B., Davis F.M. Dysbaric osteonecrosis in technical divers: The new 'at-risk' group? *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2020;50(3):295-299. <https://doi.org/10.28920/dhm50.3.295-299>

Авторская справка**Димиев Виль Венерович**

Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова.

ORCID 0009-0000-4049-2861; vil.dimiev@mail.ru

SPIN-код 8385-3547

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, подготовка иллюстраций, написание текста.

Железняк Игорь Сергеевич

Д-р мед. наук, профессор, Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова.

ORCID 0000-0001-7383-512X; igzh@bk.ru

SPIN-код 1450-5053

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, подготовка иллюстраций, написание текста.

Адаева Екатерина Николаевна

Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова.

ORCID 0009-0009-8687-9119; adaevaen@mail.ru

SPIN-код 9765-8873

Вклад автора: поиск и анализ литературы, интерпретация результатов исследования, их обработка, подготовка иллюстраций, написание текста.

Author's reference**Vil' V. Dimiev**

S.M. Kirov Military Medical Academy.

ORCID 0009-0000-4049-2861; vil.dimiev@mail.ru

SPIN-code 8385-3547

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of the research results, their processing, preparation of illustrations, writing the text.

Igor' S. Zheleznyak

Dr. Sci. (Med.), Professor, S.M. Kirov Military Medical Academy.

ORCID 0000-0001-7383-512X; igzh@bk.ru

SPIN-code 1450-5053

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of the research results, their processing, preparation of illustrations, writing the text.

Ekaterina N. Adaeva

S.M. Kirov Military Medical Academy.

ORCID 0009-0009-8687-9119; adaevaen@mail.ru

SPIN-code 9765-8873

Author's contribution: literature search and analysis, interpretation of the research results, their processing, preparation of illustrations, writing the text.