

УДК 616.71-073.75:623.974

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

# Лучевая диагностика дисбарогенных изменений костей скелета у водолазного состава Военно-морского флота

В.В. Димиев, И.С. Железняк, Е.Б. Киреева, М.Н. Можина

Военно-медицинская академия, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

Количество водолазных спусков в мире неуклонно растет, как и сложность выполняемой работы в условиях повышенного давления окружающей среды. Также в целях повышения эффективности и расширения спектра выполняемых задач увеличиваются интенсивность, глубина погружений и время пребывания водолазов в условиях гипербарии. Эти факторы способствуют росту количества водолазной патологии, в том числе поражению костей скелета дисбарогенного генеза. Применяемые при прохождении ежегодных медицинских освидетельствований водолазов рентгенологические методы диагностики не всегда позволяют обнаружить дисбарогенные изменения в костях. Кроме того, клинические проявления данной патологии не имеют явной специфичности. В связи с этим можно предположить, что частота ее встречаемости у водолазов на сегодняшний день достоверно не установлена. Данная статья посвящена обзору литературы по возможностям лучевой диагностики дисбарогенных изменений костей скелета у специалистов, работа которых связана с пребыванием в условиях повышенного давления окружающей среды. В статье освещены результаты обзора англо- и русскоязычных публикаций, представленных в базах данных PubMed и научных электронных библиотеках России (eLIBRARY.RU и CYBERLENINKA.RU). В целях определения оптимальных методов лучевой диагностики проанализированы этиологические и патогенетические аспекты развития дисбарогенных дегенеративных и некротических изменений в костях скелета, а также опыт ученых по определению соответствующей лучевой семиотики. Учитывая, что наихудшим вариантом манифестации патологии костей дисбарогенного генеза является дисбарический (асептический) остеонекроз, нами были изучены литературные источники, посвященные вопросам его клинической и инструментальной диагностики. Одним из направлений в научном поиске явились работы авторов, исследующих возможности ранней инструментальной диагностики изменений в костных тканях, в частности возможности магнитно-резонансной томографии в диагностике дисбарического остеонекроза. Кроме этого, были проанализированы данные по современным рентгенологическим методам, которые могут быть перспективны в качестве скрининг-диагностики дисбарогенных дегенеративных и некротических изменений в костях скелета.

**Ключевые слова:** асептический остеонекроз; глубоководные водолазные спуски; дайвинг; декомпрессионная болезнь; декомпрессионное газообразование; дисбарический остеонекроз; магнитно-резонансная томография.

## Как цитировать

Димиев В.В., Железняк И.С., Киреева Е.Б., Можина М.Н. Лучевая диагностика дисбарогенных изменений костей скелета у водолазного состава Военно-морского флота // Известия Российской военно-медицинской академии. 2024. Т. 43. № 2. С. 203–211. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

# Imaging of bones dysbarogenic changes in navy divers

Vil' V. Dimiev, Igor' S. Zheleznyak, Elena B. Kireeva, Mariya N. Mozhina

Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

The number of diving descents in the world is steadily growing, as is the complexity of the work performed under conditions of increased environmental pressure. Also, in order to increase efficiency and expand the range of tasks performed, the intensity, depth of dives and the time divers spend in hyperbaric conditions are increasing. These factors contribute to an increase in the number of diving pathologies, including damage to the skeletal bones of dysbarogenic genesis. X-ray diagnostic methods used during annual medical examinations of divers do not always allow the detection of dysbarogenic changes in the bones; in addition, the clinical manifestations of this pathology do not have obvious specificity. In this regard, it can be assumed that the occurrence of this pathology among divers has not been reliably established to date. This article is devoted to a review of the literature on the possibilities of radiodiagnosis of dysbarogenic changes in skeletal bones in specialists whose work involves being in conditions of high environmental pressure. The article highlights the results of a literature review of English-language and Russian-language publications presented in the databases of PubMed and scientific electronic libraries of Russia (eLIBRARY.RU and CYBERLENINKA.RU). In order to determine the optimal methods of radiation diagnostics, the etiological and pathogenetic aspects of the development of dysbarogenic degenerative and necrotic changes in the bones of the skeleton, as well as the experience of scientists in determining the corresponding radiation semiotics, were analyzed. Considering that the worst manifestation of bone pathology of dysbarogenic origin is dysbaric (aseptic) osteonecrosis, we studied the literature on the issues of its clinical and instrumental diagnosis. One of the directions in scientific research was the work of authors exploring the possibilities of early instrumental diagnosis of changes in bone tissue, in particular the possibilities of magnetic resonance imaging in the diagnosis of dysbaric osteonecrosis. In addition, data on modern x-ray methods were analyzed, which may be promising as a screening diagnosis of dysbarogenic degenerative and necrotic changes in the bones of the skeleton.

**Keywords:** aseptic osteonecrosis; decompression gas formation; decompression sickness; deep-sea diving descents; diving; dysbaric osteonecrosis; magnetic resonance imaging.

## To cite this article

Dimiev VV, Zheleznyak IS, Kireeva EB, Mozhina MN. Imaging of bones dysbarogenic changes in navy divers. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2024;43(2):203–211. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

Received: 04.12.2023

Accepted: 23.03.2024

Published: 28.06.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

# 海军潜水员骨骼高压氧生成障碍性变化的放射学诊断

Vil' V. Dimiev, Igor' S. Zheleznyak, Elena B. Kireeva, Mariya N. Mozhina

Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

## 摘要

全世界潜水任务的数量在稳步增加，在环境压力增加的情况下所做工作的复杂性也在稳步增长。此外，为了提高效率和扩大任务范围，潜水员在高压氧条件下的潜水强度、深度和停留时间也在不断增加。这些因素导致潜水病理数量的增加，包括压力异常发生的骨骼损伤。用于潜水员年度体检的X射线诊断方法并不总是能够检测到骨骼中的压力异常变化。此外，这种病症的临床表现也没有明显的特异性。因此，可以认为，迄今为止，这种病症在潜水员中的发生频率尚未得到可靠的确定。本文专门对在环境压力增大条件下工作的专家进行骨骼高压氧致畸病变放射学诊断的可能性进行了文献综述。文章重点介绍了对PubMed数据库和俄罗斯科学电子图书馆（eLIBRARY.RU和CYBERLENINKA.RU）中的英文和俄文出版物的审查结果。为了确定最佳的径向诊断方法，分析了骨骼中压力失调性退行性和坏死性变化发展的病因和发病机制，以及科学家在确定适当放射符号学方面的经验。考虑到致畸性骨病理学最严重的表现是致畸性（无菌性）骨坏死，我们研究了有关其临床和仪器诊断的文献资料。科学研究的方向之一是研究早期仪器诊断骨组织变化的可能性，特别是磁共振成像在诊断坏死性骨坏死中的可能性。此外，我们还分析了有关现代放射学方法的数据，这些方法很有可能成为对骨骼中的坏死性退行性病变进行筛查诊断的手段。

**关键词：** 无菌性骨坏死；深海潜水；潜水；减压病；减压气体；失调性骨坏死；磁共振成像。

## To cite this article

Dimiev VV, Zheleznyak IS, Kireeva EB, Mozhina MN. 海军潜水员骨骼高压氧生成障碍性变化的放射学诊断. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2024;43(2):203–211. DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar624213>

收到: 04.12.2023

接受: 23.03.2024

发布日期: 28.06.2024

## АКТУАЛЬНОСТЬ

В связи с расширением военно-политических и экономических интересов Российской Федерации продолжается активное освоение акватории Мирового океана, что требует значительного увеличения количества водолазных спусков, в том числе глубоководных.

Для выполнения подводных работ на больших глубинах и при экспозиции на грунте более 2 ч проводятся водолазные спуски методом длительного пребывания под повышенным давлением, так как они существенно эффективнее, чем кратковременные. Согласно показателю полезного времени работы, спуски этим методом опережают кратковременные в 10 раз на глубине 100 м, в 30 — на глубине 150 и в несколько сотен раз на глубинах более 300 м. На больших глубинах такие спуски являются практически единственной возможностью проведения водолазных работ. Во время таких спусков акванавты живут при давлении газовой среды, соответствующем заданной глубине, и выполняют работы на грунте до 4 ч в день, при этом для отдыха они возвращаются в барокамеру, а декомпрессия осуществляется однократно по окончании спуска. Продолжительность таких спусков может составлять 1 мес и более [1].

Организм водолаза во время осуществления спуска испытывает неблагоприятное воздействие факторов гипербарической среды: высокое гидростатическое и атмосферное давление, повышенные парциальные давления кислорода и индифферентных газов, плотность и вязкость дыхательных смесей, колебания температуры и влажности, активация условно патогенной микрофлоры и др. При регулярных глубоководных спусках и спусках методом длительного пребывания под повышенным давлением факторы гипербарической среды способствуют формированию в органах и системах необратимых патологических изменений. Таким образом, у водолазов наблюдаются специфические поражения органов и систем, связанные с их профессиональной деятельностью, не характерные для естественных возрастных изменений. К системам, наиболее подверженным действию факторов гипербарической среды, относится опорно-двигательный аппарат. По данным литературных источников, костно-суставная боль — одна из наиболее распространенных жалоб у водолазов-глубоководников и акванавтов после завершения профессиональной деятельности. Различными методами лучевой диагностики у них были выявлены множественные скрытые и прогрессирующие костно-суставные дефекты в виде участков разрежения и уплотнения трабекулярной структуры в плечевых, бедренных и большеберцовых костях и прилежащих крупных суставах [2, 3].

Во время ежегодных медицинских освидетельствований водолазов применяемые рентгенологические методы диагностики не всегда способны выявить дисбарогенные изменения в костях скелета. В связи с вышеуказанным

и отсутствием специфичности в клинических проявлениях данной патологии можно предположить, что частота ее встречаемости у водолазов на текущий момент точно не установлена.

*Цель* — на основании литературных данных сравнить клинико-морфологические и патогенетические аспекты развития дисбарогенных изменений костей скелета, а также оценить возможности современных методов лучевой диагностики по их выявлению.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В научном обзоре проанализированы и использованы данные, опубликованные в открытых отечественных и зарубежных литературных источниках.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время патогенез дисбарогенных изменений в костях, в том числе наихудшего варианта в виде дисбарического остеонекроза, до конца не изучен, но большинство авторов к основному патогенетическому фактору относят декомпрессионное газообразование (ДГ) в организме водолаза. По имеющимся литературным данным, ДГ приводит к газовой эмболизации пузырьками азота внутрикостных кровеносных сосудов и появлению зон ишемии костной ткани. Также в результате повреждения пузырьками свободного газа клеток эндотелия сосудов развивается их воспаление, происходит активация процессов гиперкоагуляции с тромбозом внутрикостных сосудов и формированием в последующем новых очагов костной ишемии [4, 5].

Кроме этого, ряд авторов отмечают, что пузырьки свободного газа, образующиеся внутри костного мозга, приводят к его механическому повреждению и развитию отека. Формирующаяся при этом компрессия синусоидальной системы способствует развитию венозного стаза, повышению периферического сосудистого сопротивления и в конечном итоге приводит к усилению отека, что еще больше увеличивает внутрикостное давление, вызывая «компармент-синдром». Таким образом замыкается порочный круг и усиливается ишемия. Также в результате повреждения пузырьками свободного газа адипоцитов кости может развиваться жировая эмболия внутрикостных сосудов [6, 7].

В некоторых исследованиях было продемонстрировано, что ДГ оказывает существенное влияние на механизмы свертывания крови. В процессе проведения научных экспериментов у обследуемых лиц были выявлены повышение вязкости крови и сокращение времени свертывания, а также образование фибриновых сгустков при развитии аэроземболии. В постдекомпрессионный период также отмечаются повышенная активность тромбина, сниженный уровень тромбопластина и увеличение тромбинового времени. На основании результатов научных

исследований, проведенных отечественными и зарубежными специалистами, была доказана возможность профилактики и лечения декомпрессионной болезни при помощи антикоагулянтов [8, 9].

По одной из гипотез, регулярное воздействие на организм декомпрессионного газообразования при профессиональной деятельности водолазов может запускать процессы, аналогичные механизму развития синдрома диссеминированного внутрисосудистого свертывания. Известно, что при водолазном спуске и в ближайшее время после его окончания происходят изменения, связанные с существенным нарушением гемостаза в организме водолазов. Однако не всегда развитие ДГ сопровождается локальным стазом, а в случае его появления не каждое нарушение микроциркуляции является необратимым [10].

Головки трубчатых костей в основном состоят из губчатого костного вещества, характеризующегося порами разного размера, содержащими участки с различным соотношением воды и жира. По данным научных исследований, проведенных с помощью магнитно-резонансной спектроскопии группой ученых во главе с Tsung-Tai Lin, в губчатой костной ткани молекулы воды существуют в трех различных формах: свободная вода в порах, связанная вода в коллагеновой сети (включая границу раздела коллаген–минерал) и прочно связанная вода в минеральных образованиях кости. Свободная вода более распространена в пограничных зонах, тогда как жир занимает преимущественно центральную зону каждой поры. Взаимодействия между свободными молекулами воды и жиром в норме не существует из-за их раздельного расположения в головках бедренных костей, тогда как при дисбарогенных изменениях вода перераспределяется к центральной зоне пор и взаимодействует с функциональными группами жировой ткани. Зарубежные авторы в своем исследовании предполагают, что боль в тазобедренных суставах у водолазов может возникать на фоне внутрикостной гипертензии, когда кровь под давлением поступает из артерий в расширенные и емкие венозные синусоиды. В дальнейшем это приводит к снижению скорости кровотока, увеличению вязкости крови, а также к венозному застою, тромбозу и, наконец, к развитию венозной ишемии в костной ткани [11].

По результатам исследований H. Bolte можно утверждать, что дисбарический (асептический) остеонекроз как терминальная стадия развития дисбарогенных изменений в костях является одним из профессиональных заболеваний водолазов, которое в перспективе существенно влияет на качество жизни. Частота встречаемости дисбарического остеонекроза в разных странах мира значительно отличается, что предположительно связано не только с различными физическими условиями и использованием небезопасных методов выполнения водолазных спусков, но и с диагностическими возможностями медицины. Наиболее высокие показатели встречаемости были зарегистрированы у японских и турецких профессиональных

дайверов (до 71 %). По другим данным, распространенность дисбарического остеонекроза в западных странах составляет от 2 до 5 % у военных водолазов, от 25 до 35 % у кессонных рабочих, от 16 до 55 % у коммерческих дайверов и от 50 до 65 % у дайверов-рыбаков, что в целом коррелирует с другими имеющимися статистическими данными [5, 12].

Боли при дисбарическом остеонекрозе, как и при декомпрессионной болезни, чаще локализуются в тех отделах костно-суставной системы, на которые приходилась наиболее интенсивная физическая нагрузка в период выполнения работ под повышенным давлением [2].

На основании литературных данных было установлено, что дисбарический остеонекроз наиболее часто поражает головку бедренной кости, а также нередко может встречаться в головке плечевой кости и костях, образующих коленный сустав. Кроме этого, дисбарический остеонекроз у глубоководных водолазов характеризуется поражением не только участков костей, находящихся рядом с суставной поверхностью, но и более удаленных участков: проксимальных метафизов и эпиметафизов бедренной, плечевой и большеберцовой костей, а также диафизов длинных трубчатых костей. Поражения диафизов длинных трубчатых костей являются редкими диагностическими находками в связи с незначительными клиническими проявлениями или вовсе бессимптомным течением. Поражения головок костей могут иметь классический вид серповидной полоски под суставным хрящом или быть неправильной округлой или вытянутой формы, окруженной со всех сторон костной тканью. В последующем сформированные очаги субхондрального некроза кости могут способствовать разрывам суставного хряща и в определенных случаях приводить к субхондральным переломам суставных поверхностей костей [5, 13].

При гистологическом исследовании поврежденных участков костей были обнаружены пустые остеоцитарные лакуны, что соответствует остеонекрозу. На ранней стадии остеонекроза было отмечено отсутствие окрашивания ядер клеток костного мозга, а также появление в них больших жиросодержащих образований овальной формы [14].

Несмотря на то что на сегодняшний день не существует золотого стандарта в лечении дисбарического остеонекроза, некоторые хирургические и консервативные методы лечения доказали свою эффективность на разных стадиях заболевания. Консервативные методы лечения ранних стадий дисбарического остеонекроза включают снижение нагрузки на пораженную конечность при помощи ортопедических устройств, лечебную физкультуру для укрепления мышечно-связочного аппарата и пероральную терапию бисфосфонатами. К основным хирургическим методам относят внутрикостную декомпрессию, которую целесообразно производить на ранних стадиях, а также оперативные вмешательства с применением

костных аутотрансплантатов и эндопротезирование поврежденных суставов [15].

По имеющимся в литературе данным, в настоящее время перспективной альтернативой костным ауто- и аллотрансплантатам являются синтетические биорезорбируемые материалы. Благодаря их химическому сходству с составом костной ткани они представляют собой структурные аналоги минерального компонента костного вещества. Особый интерес представляют синтетические биорезорбируемые материалы для замещения костей, изготовленные на основе  $\beta$ -трикальций фосфата, фосфата кальция и кальций-дефицитного гидроксиапатита. Эти материалы отличаются высокой биосовместимостью и специфичностью по отношению к костной ткани, а также обладают высокими прочностными характеристиками после застывания. Кроме того, наличие цементных форм этих материалов обеспечивает отличные условия для их применения и полноценного заполнения образовавшихся в результате остеонекроза костных дефектов. Комбинирование классических методов лечения асептического остеонекроза с последующей пластикой костных дефектов с помощью биорезорбируемых материалов, проводимых на ранних стадиях развития патологического процесса, позволяет эффективно купировать болевой синдром и восстанавливать функцию пораженных суставов [16].

На основании результатов научных исследований отечественных ученых совместное использование замещающих зону очага остеонекроза трансплантатов и обогащенной тромбоцитами плазмы, при проведении органосохраняющих операций представляется эффективным способом отсрочки операции тотального эндопротезирования тазобедренного сустава не только на ранних, но и на более поздних стадиях [17].

Своевременное лечение остеонекроза может способствовать практически полному выздоровлению. При позднем лечении или его отсутствии остеонекроз нередко приводит к внутрисуставным переломам костей, потере функции суставов и неблагоприятному исходу в виде тотального эндопротезирования. Поэтому своевременное выявление остеонекроза имеет большое значение. Для его ранней диагностики исследователями были опробованы разные методы лучевой диагностики: рентгенография, компьютерная рентгеновская томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), однофотонная эмиссионная томография, цифровая субтракционная ангиография и лазерная доплерография [18].

К основным требованиям, предъявляемым к диагностическим методам обнаружения дисбарогенных изменений костей скелета, относятся: получение ранней информации о точной локализации места поражения, его формы и стадии патологического процесса.

В связи с неинвазивностью, простотой и доступностью метод рентгенографического исследования получил наибольшую распространенность в диагностике патологии костно-суставного аппарата. Рентгенография позволяет

уточнить структуру кости, выявить очаговые зоны разрежения или уплотнения костной ткани, ее контуры, провести рентгенометрические исследования, определить анатомическое соотношение суставных поверхностей и оценить ширину суставной щели [19].

С помощью рентгенографии на стадии формирования необратимого остеонекроза в субхондральной области эпифиза будет определяться участок повышенной плотности серповидной формы различных размеров, что соответствует развитию остеосклероза. В дальнейшем на рентгенограммах между участком остеонекроза и эпифизом кости будут определяться полоски просветления (остеопороза) с последующим полным отделением фрагмента от кости и формированием секвестра овальной или дисковидной формы. Кроме этого, поздние стадии остеонекроза характеризуются рентгенологической картиной вдавленных субхондральных переломов с отделением некротизированных фрагментов от кости, а при соответствующей локализации некрозу может подвергаться почти вся суставная поверхность. Стадия исхода рентгенологически характеризуется отсутствием некротического секвестра, изменением формы эпифиза в области участка некроза, наличием остеофитов и субхондрального остеосклероза суставных поверхностей [20].

По сравнению с рентгенографией КТ является более чувствительным методом, обладающим большей информативностью, высоким пространственным разрешением, позволяющим получить более детальные изображения костей и костной патологии. На полученных с помощью КТ изображениях остеонекроз может визуализироваться практически на всех стадиях развития в виде измененных костных трабекул, участков склероза эпифизов костей, субхондральных переломов и деформаций суставных поверхностей. На основании проведенных исследований по сравнению эффективности КТ и МРТ в диагностике остеонекроза отмечается, что в выявлении сформировавшихся структурных изменений в кости КТ оказалась более информативным методом. При этом чувствительность КТ в диагностике ранних проявлений остеонекроза составила всего 38,7 %, что доказывает целесообразность применения этого метода на поздних стадиях патологического процесса [2, 21].

Также многие исследователи отмечают, что метод КТ позволяет выявлять участки субхондральных переломов, которые могут не визуализироваться на МРТ. Кроме того, КТ может использоваться для более детальной оценки эффективности лечения и динамического наблюдения за изменениями в пораженных участках костей [22].

КТ также показала свою эффективность при ранней диагностике декомпрессионной болезни водолазов и дайверов. Так, с помощью этого метода в различных тканях организма, включая интрамедуллярное пространство костей и полости крупных суставов, был обнаружен свободный газ, образовавшийся в результате декомпрессионного газообразования [23, 24].

Недостатком рентгенографии и КТ является длительное «дорентгеновское» течение ранней стадии асептического остеонекроза, при котором рентгенологические изменения обычно отсутствуют, что значительно осложняет диагностику. Только в случае образования обширной зоны костной ишемии в области эпифизов, сопровождающейся выраженной воспалительной реакцией, на рентгенограммах могут определяться полосы разрежения костной ткани, возникающие в результате локального остеопороза [19].

Анализ результатов научных исследований позволяет утверждать, что МРТ обладает большей информативностью в выявлении дисбарогенных изменений костей по сравнению с другими лучевыми методами диагностики и считается золотым стандартом визуализации для ранней стадии остеонекроза. По некоторым данным, частота обнаружения остеонекроза при использовании МРТ составила 97,7 %, а чувствительность диагностики ранней стадии остеонекроза достигла 94,7 % [25].

Исследование, проведенное в Японии группой ученых, включало анализ результатов МРТ и рентгенографии крупных суставов у водолазов. В ходе исследования ученые выявили очаги остеонекроза в проксимальных отделах плечевых и бедренных костей, а также в областях дистального метаэпифиза бедренной кости и проксимального метаэпифиза большеберцовой кости. Отмечено, что проксимальный отдел плечевой кости чаще подвергается поражению у водолазов, погружающихся на большие глубины. В связи с этим авторы считают обязательным регулярное проведение МРТ плечевых суставов для водолазов-глубоководников. Кроме того, в данном исследовании было отмечено, что нередко дисбарогенные ишемические поражения костей имели мультифокальное распределение. В связи с этим пациентам с диагностированным дисбарическим остеонекрозом костей, формирующих плечевые и коленные суставы, рекомендуется проведение МРТ области тазобедренных суставов с целью выявления очагов остеонекроза головок бедренных костей [26].

МРТ, зарекомендовавшая себя как неинвазивный и высокоспецифичный метод лучевой диагностики, при наличии соответствующего анамнеза и клинических проявлений является диагностическим методом выбора в определении зон костной ишемии и участков остеонекроза. Этот метод позволяет уточнить локализацию, размеры и структуру костных дефектов, а также изучить функциональные характеристики и представить результаты в виде трехмерной модели. С помощью МРТ возможно обнаруживать субкортикальные кисты, участки остеосклероза и остеопороза, последствия инфарктов метадиафизов и диафизов, а также отек костного мозга в виде области МР-сигнала низкой интенсивности на T1-взвешенных изображениях и высокой интенсивности на изображениях в T2-взвешенных последовательностях [18, 22].

По имеющимся литературным данным определенные последовательности МРТ показали свою эффективность в количественном определении жира и воды в тканях, в том числе костных. Все существующие в МРТ методики по определению количественной информации о водно-жировом составе исследуемой ткани сводятся в конечном итоге к разделению МР-сигналов, идущих от протонов, входящих в состав воды и жира. При воздействии внешнего магнитного поля, протоны, находящиеся в жировой ткани и воде, генерируют МР-сигналы с различными резонансными частотами. Это обусловлено изменениями в возникающих локальных магнитных полях из-за различия в химическом строении молекул. Разница между резонансными частотами МР-сигналов от молекул воды и жира создает фазовый сдвиг между регистрируемыми сигналами этих двух спектральных компонент, который является гармонической функцией времени эха. В методике МРТ, кодированной по химическому сдвигу — Chemical Shift Encoded Magnetic Resonance Imaging, с помощью выборки МР-сигналов с различным временем эхо-сигнала можно количественно оценить сигналы, исходящие от жира и воды [27].

Группа зарубежных ученых, используя в своих исследованиях количественную МРТ, обнаружила у водолазов с болью в тазобедренных суставах увеличение содержания воды и ненасыщенных липидов, а также снижение общей липидной фракции в головках обоих бедренных костей, при этом другие проявления дисбарического остеонекроза не наблюдались. Выявленное более высокое содержание молекул воды в головке бедра у водолазов с болевым симптомом предполагает прямую связь между болью в тазобедренном суставе и увеличением количества воды в губчатой костной ткани в результате отека. Кроме этого, на фоне указанных изменений учеными было выявлено снижение общего количества жира. Полученные результаты соответствуют патогенетическим аспектам развития ранней дисбарической ишемии, соответственно применение методов количественной МРТ может быть эффективным диагностическим инструментом в раннем выявлении дисбарического остеонекроза и дисбарогенных изменений в костях [11].

В результате научных исследований, выполненных в Военно-медицинской академии, у завершивших свою профессиональную деятельность акванавтов с помощью МРТ были выявлены множественные прогрессирующие, скрытые и клинически значимые костно-суставные дефекты. В связи с этим можно утверждать, что костно-суставное ремоделирование у водолазов-глубоководников продолжается и в период отдаленного последствия глубоководных насыщенных спусков, что требует проведения регулярных обследований данной категории пациентов с помощью МРТ [2].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа литературных данных можно предположить, что в настоящее время отсутствуют полноценные научные исследования о возможностях современных методик лучевой диагностики при выявлении дисбарогенных дегенеративных и некротических изменений костных тканей у специалистов, работа которых связана с пребыванием в условиях повышенного давления окружающей среды, в том числе у действующих водолазов Военно-морского флота. В частности, не разработана общепринятая методика МРТ по выявлению и морфологической оценке дисбарогенных изменений костей скелета у отдельных групп водолазов. Недостаточно изучены возможности методов количественной МРТ и МР-спектроскопии в ранней (экспресс) диагностике предполагаемых дисбарогенных изменений костей.

Имеется необходимость в установлении связи дисбарогенных изменений костей скелета с воздействием неблагоприятных факторов водолазного труда, количеством и глубиной водолазных спусков, возрастом, продолжительностью водолазного стажа и имеющейся в анамнезе водолазной патологии посредством проведения лучевых исследований представителей различных категорий

военных водолазов. Углубленное исследование методических подходов в лучевой диагностике дисбарогенных изменений костей скелета может помочь в усовершенствовании системы профилактики и лечения данной патологии, а также реабилитации соответствующих специалистов Военно-морского флота.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Финансирование.** Поисково-аналитическая работа проведена на личные средства авторского коллектива.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Этическая экспертиза.** Проведение этической экспертизы не требуется, так как статья носит обзорный характер и не содержит каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов изучения.

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаков А.В., Мотасов Г.П., Неустроев А.П., и др. Метод длительного пребывания под повышенным давлением: история развития, направления исследований, перспективы применения // Экология человека. 2010. № 2. С. 17–21. EDN: KYZPSH
2. Чумаков А.В., Сухорослова И.Е., Адаева Е.Н., и др. Закономерности развития и динамика костно-суставных изменений в периоде отдаленного последствия глубоководных насыщенных водолазных спусков // Медицина катастроф. 2013. № 1 (81). С. 17–22. EDN: PXJWCN
3. Василец В.М., Желиховский С. Е., Следков А. Ю., и др. Водолазная профпатология. История и актуальность // Клиническая больница. 2015. № 2 (12). С. 34–38. EDN: TVXTST
4. 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. Vol. 60, N 4. P. 388–388. doi: 10.3325/cmj.2019.60.38
5. Uguen M., Pougnet R., Uguen A., et al. Dysbaric osteonecrosis among professional divers: A literature review // Undersea Hyperb. Med. 2014. Vol. 41, N 6. P. 579–587. PMID: 25562949
6. 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. Т. 61, № 2. С. 220–235. EDN: RYSTKH doi: 10.47360/1995-4484-2023-220-235
7. Gempp E., Louge P., Maistre S. Predictive factors of dysbaric osteonecrosis following musculoskeletal decompression sickness in recreational SCUBA divers // Joint Bone Spine. 2016. Vol. 83, N 3. P. 357–358. doi: 10.1016/j.jbspin.2015.03.010
8. Wells P.S., Anderson D.R., Rodger M., et al. Evaluation of D-dimer in the diagnosis of suspected deep-vein thrombosis // N. Engl. J. Med. 2003. Vol. 349, N 13. P. 1227–1235. doi: 10.1056/NEJMoa023153
9. Miyanishi K., Kamo Y., Ihara H., et al. Risk factors for dysbaric osteonecrosis // Rheumatology (Oxford). 2006. Vol. 45, N 7. P. 855–858. doi: 10.1093/rheumatology/ke013
10. Мясников А.А., Ефищенко Е.В., Зверев Д.П., и др. Хроническая декомпрессионная болезнь и ее диагностика // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2018. № 4 (64). С. 26–31. EDN: YOIRIT
11. 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 // Quant. Imaging Med. Surg. 2022. Vol. 12, N 1. P. 43–52. doi: 10.21037/qims-21-148
12. Bolte H., Koch A., Tetzlaff K., et al. Detection of dysbaric osteonecrosis in military divers using magnetic resonance imaging // Eur. Radiol. 2005. Vol. 15, N 2. P. 368–375. doi: 10.1007/s00330-004-2452-8
13. Свистов А.С., Чумаков А.В., Мотасов Г.П., и др. Рентгенологическая характеристика состояния опорно-двигательного аппарата акванавтов // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2005. № 2. С. 233–238.
14. Fondi C., Franchi A. Definition of bone necrosis by the // Clin. Cases Miner. Bone Metab. 2007. Vol. 4, N 1. P. 21–26.
15. Sharareh B., Schwarzkopf R. Dysbaric osteonecrosis: a literature review of pathophysiology, clinical presentation, and



management // *Clin. J. Sport Med.* 2015. Vol. 25, N 2. P. 153–161. doi: 10.1097/JSM.0000000000000093

16. Конев В.А., Тихилов Р.М., Шубняков И.И., и др. Эффективность использования биорезорбируемых материалов для заполнения костных полостей при остеонекрозе головки бедренной кости // *Травматология и ортопедия России.* 2014. № 3 (73). С. 28–38. EDN: SYSQMV doi: 10.21823/2311-2905-2014-0-3-28-38

17. Корыткин А.А., Зыкин А.А., Захарова Д.В., и др. Применение обогащенной тромбоцитами плазмы при замещении очага аваскулярного некроза головки бедренной кости аллотрансплантатами // *Травматология и ортопедия России.* 2018. Т. 24, № 1. С. 115–122. EDN: YVGNQU doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-115-122

18. 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 // *J. Orthop. Surg. Res.* 2018. Vol. 13, N 1. P. 167. doi: 10.1186/s13018-018-0836-8

19. Ахтямов И.Ф., Закиров Р.Х., Лобашов В.В. Современные методы визуализации в диагностике остеонекроза головки бедренной кости // *Вестник современной клинической медицины.* 2014. Т. 7, № S2. С. 29–39. EDN: VSHFGR

20. Брюханов А.В., Васильев А.Ю. МРТ диагностика остеонекроза // *Медицинская визуализация.* 2009. № 4. С. 14–19. EDN: KZGJIV

21. Ge H., Wang Z., Zhang J. X-ray, digital tomographic fusion, CT, and MRI in early ischemic necrosis of the femo-

ral head // *Medicine.* 2024. Vol. 103, N 2. P. e36281. doi: 10.1097/MD.00000000000036281

22. Hernigou P., Hernigou J., Scarlat M. Shoulder osteonecrosis: pathogenesis, causes, clinical evaluation, imaging, and classification // *Orthop. Surg.* 2020. Vol. 12, N 5. P. 1340–1349. doi: 10.1111/os.12788

23. Jitsuiki K., Kushida Y., Nishio R., et al. Gas in joints after diving: computed tomography may be useful for diagnosing decompression sickness // *Wilderness Environ. Med.* 2021. Vol. 32, N 1. P. 70–73. doi: 10.1016/j.wem.2020.09.006

24. Siaffa R., Luciani M., Grandjean B., et al. Massive portal venous gas embolism after scuba diving // *Diving Hyperb. Med.* 2019. Vol. 49, N 1. P. 61–63. doi: 10.28920/dhm49.1.61-63

25. 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 Res. Ther.* 2021. Vol. 12, N 1. Art. 503. doi: 10.1186/s13287-021-02572-7

26. Shinoda S., Hasegawa Y., Kawasaki S., et al. Magnetic resonance imaging of osteonecrosis in divers: comparison with plain radiographs // *Skeletal Radiology.* 1997. Vol. 26, N 6. P. 354–359. doi: 10.1007/s002560050247

27. Bray JP.T., Chouhan M.D., Punwani S., et al. Fat fraction mapping using magnetic resonance imaging: insight into pathophysiology // *Br. J. Radiol.* 2018. Vol. 91, N 1089. Art. 20170344. doi: 10.1259/bjr.20170344

## REFERENCES

1. Tchumakov AV, Motasov GP, Neustroev AP, et al. Deep saturation dives: history of technology development, ways of research and perspectives of use. *Ekologiya cheloveka.* 2010;(2):17–21. (In Russ.) EDN: KYZPSH

2. Tchumakov AV, Suhoroslova IE, Adaeva EN, et al. Consistent pattern and dynamics of osteoarticular changes as long-term aftereffect of deep water saturation diving. *Disaster Medicine.* 2013;(1(81)): 17–22. (In Russ.) EDN: PXJCWN

3. Vasilets VM, Zhelikhovskiy SE, Sledkov AY, et al. Diving pathology. History and current situation. *The Hospital.* 2015;(2(12)):34–38. (In Russ.) EDN: TVXTST

4. 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. doi: 10.3325/cmj.2019.60.388

5. Uguen M, Pougnet R, Uguen A, et al. Dysbaric osteonecrosis among professional divers: A literature review. *Undersea Hyperb Med.* 2014;41(6):579–587. PMID: 25562949

6. Byalik VE, Makarov MA, Byalik EI, 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.) EDN: RYSTKH doi: 10.47360/1995-4484-2023-220-235

7. Gempp 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. doi:10.1016/j.jbspin.2015.03.010

8. Wells PS, Anderson DR, Rodger M, et al. Evaluation of D-dimer in the diagnosis of suspected deep-vein thrombosis. *N Engl J Med.* 2003;349(13):1227–1235. doi: 10.1056/NEJMoa023153

9. Miyanishi K, Kamo Y, Ihara H, et al. Risk factors for dysbaric osteonecrosis. *Rheumatology (Oxford).* 2006;45(7):855–858. doi: 10.1093/rheumatology/kel013

10. Myasnikov AA, Efitsenko EV, Zverev DP, et al. Chronic decompression sickness and its diagnosis. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy.* 2018;(4(64)):26–31. (In Russ.) EDN: YOIRIT

11. 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. *Quant Imaging Med Surg.* 2022;12(1):43–52. doi: 10.21037/qims-21-148

12. Bolte H, Koch A, Tetzlaff K, et al. Detection of dysbaric osteonecrosis in military divers using magnetic resonance imaging. *Eur Radiol.* 2005;15(2):368–375. doi: 10.1007/s00330-004-2452-8

13. Svistov AS, Tchumakov AV, Motasov GP, et al. Radiological characteristics of the state of the musculoskeletal system of aquanauts. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy.* 2005;(2):233–238. (In Russ.)

14. Fondi C., Franchi A. Definition of bone necrosis by the. *Clin Cases Miner Bone Metab.* 2007;4(1):21–26.

15. Sharareh B, Schwarzkopf R. Dysbaric osteonecrosis: a literature review of pathophysiology, clinical presentation, and management. *Clin J Sport Med.* 2015;25(2):153–161. doi: 10.1097/JSM.0000000000000093

16. Konev VA, Tikhilov RM, Shubnyakov II, et al. Bioresorbable materials for bone defects substitution in patients with osteonecrosis of the femoral head. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2014;(3(73)):28–38. (In Russ.) EDN: SYSQMV doi: 10.21823/2311-2905-2014-0-3-28-38
17. Korytkin AA, Zykin AA, Zakharova DV, et al. Bone grafting enhanced by platelet-rich plasma in treatment of avascular necrosis of femoral head. *Traumatology and orthopedics of Russia*. 2018;24(1):115–122. (In Russ.) EDN: YVGNQU doi: 10.21823/2311-2905-2018-24-1-115-122
18. 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. *J Orthop Surg Res*. 2018;13(1):167. doi: 10.1186/s13018-018-0836-8
19. Akhtyamov IF, Zakirov RH, Lobashov VV. Current methods of visualization and diagnostic of avascular necrosis of hip. *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine*. 2014;7(S2):29–39. (In Russ.) EDN: VSHFGR
20. Bryukhanov AV, Vasilyev Ayu. MR imaging of osteonecrosis. *Medical imaging*. 2009;(4):14–19. (In Russ.) EDN: KZGJIV
21. Ge H, Wang Z, Zhang J. X-ray, digital tomographic fusion, CT, and MRI in early ischemic necrosis of the femoral head. *Medicine*. 2024;103(2): e36281. doi: 10.1097/MD.00000000000036281
22. Hernigou P, Hernigou J, Scarlat M. Shoulder osteonecrosis: pathogenesis, causes, clinical evaluation, imaging, and classification. *Orthop Surg*. 2020;12(5):1340–1349. doi: 10.1111/os.12788
23. Jitsuiki K, Kushida Y, Nishio R, et al. Gas in joints after diving: computed tomography may be useful for diagnosing decompression sickness. *Wilderness Environ Med*. 2021;32(1): 70–73. doi: 10.1016/j.wem.2020.09.006
24. Siaffa R, Luciani M, Grandjean B, et al. Massive portal venous gas embolism after scuba diving. *Diving Hyperb Med*. 2019;49(1):61–63. doi: 10.28920/dhm49.1.61-63
25. Guzman RA, 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 Res Ther*. 2021;12(1):503. doi: 10.1186/s13287-021-02572-7
26. 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. doi: 10.1007/s002560050247
27. Bray JPT, Chouhan MD, Punwani S, et al. Fat fraction mapping using magnetic resonance imaging: insight into pathophysiology. *Br J Radiol*. 2018;91(1089):20170344. doi: 10.1259/bjr.20170344

## ОБ АВТОРАХ

**\*Виль Венерович Димиев**; адрес: Россия, 194044, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; ORCID: 0009-0000-4049-2861; eLibrary SPIN: 8385-3547; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Игорь Сергеевич Железняк**, докт. мед. наук, профессор; ORCID: 0000-0001-7383-512X; eLibrary SPIN: 1450-5053; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Елена Борисовна Киреева**, канд. мед. наук; ORCID: 0009-0000-4526-9802; eLibrary SPIN: 8954-1927; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Мария Николаевна Можина**; ORCID: 0009-0008-1440-0503; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

## AUTHORS' INFO

**\*Vil' V. Dimiev**; address: 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, 194044, Russia; ORCID: 0009-0000-4049-2861; eLibrary SPIN: 8385-3547; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Igor' S. Zheleznyak**, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor; ORCID: 0000-0001-7383-512X; eLibrary SPIN: 1450-5053; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Elena B. Kireeva**, M.D., Ph.D. (Medicine); ORCID: 0009-0000-4526-9802; eLibrary SPIN: 8954-1927; e-mail: vmeda-nio@mil.ru

**Mariya N. Mozhina**; ORCID: 0009-0008-1440-0503; e-mail: vmeda-nio@mil.ru