

ОБЗОРЫ/REVIEWS

УДК 612.274, 612.466

doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-2-7-20>**ВОДНО-ЭЛЕКТРОЛИТНЫЙ ОБМЕН И ФУНКЦИИ ПОЧЕК
ПРИ ДЕЙСТВИИ ФАКТОРОВ ГИПЕРБАРИИ**

¹А. Ю. Шитов*, ¹Д. П. Зверев, ¹А. А. Мясников, ¹И. Р. Кленков, ^{1,2}А. Н. Андрусенко,
¹З. М. Исрафилов, ¹С. П. Колчанов

¹Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

²Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины ФМБА России,
Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ. В многочисленных исследованиях в области гипербарической физиологии и водолазной медицины отмечены изменения водно-электролитного обмена, а также функций почек человека и животных при нахождении в условиях повышенного давления газовой и водной сред. Несмотря на неоспоримое участие жидкости в процессах насыщения-рассыщения организма от индифферентного газа, а также в процессах поддержания осмотического гомеостаза, роль водно-электролитного обмена и функций почек в процессах адаптации к условиям гипербарии остается недостаточно исследованной.

ЦЕЛЬ. Выявить механизмы и закономерности изменений водно-электролитного обмена и функций почек при действии факторов гипербарии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Проведен обзор работ из наукометрических баз данных: eLibrary.ru, РИНЦ, Scopus, PubMed, Cochrane, Google Scholar, www.academickeys.com, Ulrichsweb, www.research4life.org, www.lens.org, www.cabi.org, rucont.ru, www.ebsco.com, www.mendeley.com, OpenCitations.net, unpaywall.org, xueshu.baidu.com, www.wikidata.org, na.neicon.ru, keepers.issn.org. Поиск проводился по ключевым словам и словосочетаниям на русском и английском языках: водолаз, водно-электролитный обмен, выделительная система, функции почек, диурез, почка, токсическое действие азота, гипероксия, гипоксия, декомпрессионная болезнь, токсическое действие кислорода. Проанализировано 155 литературных источников за 1975–2023 гг., из которых в обзор было включено 53 работы, которые соответствовали критериям включения и исключения. При этом из включенных в обзор работ не менее 80 % были изданы в течение последних десяти лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ. В большинстве проанализированных работ содержится информация о нарастании диуреза в ходе подводных погружений у большинства испытуемых. Кроме усиления диуреза отмечается увеличение выделения с мочой натрия и калия, коррелировавшее с количеством образовавшейся мочи. В условиях гипербарии часто выявляется гипернатриемия и увеличение гидратации тканей, обусловленные токсическим действием кислорода, пересыщением тканей организма индифферентными газами и токсическим действием азота. В условиях гипербарии ренин-ангиотензин-альдостероновая система (РААС) и ее основной компонент альдостерон играют ключевую роль в изменениях водно-электролитного обмена. Роль антидиуретического гормона интересна тем, что у него обнаружена масса «неклассических» эффектов, которые вполне могли проявляться в условиях гипербарии и никогда ранее не ассоциировались с действием повышенного давления на регуляцию водно-электролитного обмена.

ОБСУЖДЕНИЕ. Нахождение в условиях повышенного давления газовой и водной сред сопровождается многочисленными и порой разнонаправленными изменениями в водно-электролитном обмене и функциях почек. Потеря воды и электролитов организмом, регистрируемая биоимпедансными методами в ходе действия факторов гипербарии, может приводить к дегидратации. Это, в свою очередь, может увеличивать риск развития специфических заболеваний водолазов, прежде всего таких, как декомпрессионная болезнь. В исследованной литературе не содержится и четких рекомендаций по коррекции водно-электролитного баланса у водолазов. В некоторых работах представлены данные, указывающие на возможность и полезность приема жидкостей (напитков) или фармакологических препаратов, влияющих на водно-электролитный обмен водолазов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Анализ данных литературы показал, что в условиях действия факторов гипербарии возникают специфические изменения водно-электролитного обмена и функций выделительной системы. У большинства испытуемых эти изменения заключаются в усилении диуреза, гипернатриемии и снижении гидратации тканей. В тех случаях, когда

© Авторы, 2024. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины федерального медико-биологического агентства». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа» в соответствии с лицензией ССВУ-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

действие неблагоприятных факторов гипербарии приводило к развитию патологических изменений, отмечалась гипергидратация тканей и нарастание концентрации в крови калия, а также снижение содержания натрия в моче. Это может указывать на возможность формирования в условиях гипербарии специфического феномена «диуреза давления». Все изменения, происходящие в организме под действием факторов гипербарии, необходимо рассматривать с позиций индивидуальной устойчивости к этим факторам и в первую очередь к декомпрессионной болезни. Исследования водно-электролитного обмена и функций почек водолазов в условиях действия неблагоприятных факторов гипербарии актуальны с целью разработки системы мер коррекции и профилактики выявленных нарушений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, водолаз, диурез давления, декомпрессионная болезнь, водно-электролитный обмен, токсическое действие азота, токсическое действие кислорода, гипоксическая гипоксия

*Для корреспонденции: Шитов Арсений Юрьевич, e-mail: arseniyshitov@mail.ru

*For correspondence: Arseniy Yu. Shitov, e-mail: arseniyshitov@mail.ru

Для цитирования: Шитов А. Ю., Зверев Д. П., Мясников А. А., Кленков И. Р., Андрусенко А. Н., Исрафилов З. М., Колчанов С. П. Водно-электролитный обмен и функции почек при действии факторов гипербарии // *Морская медицина*. 2024. Т. 10, № 2. С. 7–20. doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-2-7-20> EDN: <https://elibrary.ru/SBNTUA>
For citation: Shitov A. Yu., Zverev D. P., Myasnikov A. A., Klenkov I. R., Andrusenko A. N., Israfilov Z. M., Kolchanov S. P. Water-electrolyte metabolism and renal function under action of hyperbaric factors // *Marine Medicine*. 2024. V. 10, No. 2. S. 7–20. doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2024-10-2-7-20> EDN: <https://elibrary.ru/SBNTUA>

WATER-ELECTROLYTE METABOLISM AND RENAL FUNCTION UNDER ACTION OF HYPERBARIC FACTORS

¹Arseniy Yu. Shitov*, ¹Dmitriy P. Zverev, ¹Aleksey A. Myasnikov, ¹Ilyas R. Klenkov, ^{1,2}Andrey N. Andrusenko, ¹Zagir M. Israfilov, ¹Sergey P. Kolchanov

¹Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

²Scientific research institute of industrial and marine medicine Federal medical and biological agency, St. Petersburg, Russia

INTRODUCTION. Numerous studies in the field of hyperbaric physiology and diving medicine note changes in the water-electrolyte metabolism as well as renal function of men and animals in conditions of high pressure of gas and water environments. Despite undeniable water part in the process of body saturation-desaturation from indifferent gas as well as in processes of maintaining osmotic homeostasis, the role of water-electrolyte metabolism and renal functions in adaptation processes to hyperbaric conditions remains under-researched.

OBJECTIVE. To determine mechanisms and patterns of changes in the water-electrolyte metabolism and renal functions under the action of hyperbaric factors.

MATERIALS AND METHODS. Review work of scientometric databases was conducted: eLibrary.ru, RSCI, Scopus, PubMed, Cochrane, Google Scholar, www.academickeys.com, Ulrichsweb, www.research4life.org, www.lens.org, www.cabi.org, rucont.ru, www.ebsco.com, www.mendeley.com, OpenCitations.net, unpaywall.org, xueshu.baidu.com, www.wikidata.org, na.neicon.ru, keepers.issn.org: the search was done by keywords and phrases in Russian and English: a diver, water-electrolyte metabolism, excretory system, renal functions, diuresis, kidney, nitrogen toxic effect, hyperoxia, hypoxia, decompression sickness, oxygen toxic effect. 155 literary sources of 1975–2023 were analyzed, 53 works of which were included in the review, met the criteria for inclusion and exclusion. In this case, at least 80 % of works, included in the review, have been published for the past 10 years.

RESULTS. Most analyzed works contain information on an increase in diuresis in most subjects in the course of diving. Apart from it, there is an increase in the excretion of sodium and potassium in the urine, correlated with the amount of urine produced. Hypernatremia and an increase in tissue hydration are often revealed in the hyperbaric conditions, cause by oxygen toxic effect, supersaturation of body tissues with indifferent gases and nitrogen toxic effect. Renin-angiotensin-aldosterone system (RAAS) and its main component aldosterone play a key role in changes of the water-electrolyte metabolism in the hyperbaric conditions. The role of antidiuretic hormone is interesting because a lot of “non-classical” effects are uncovered in it that could be manifested in hyperbaric conditions and have never been associated with the action of high pressure on the regulation of the water-electrolyte metabolism.

DISCUSSION. Staying in conditions of increased pressure of the gas and water environment is subject to numerous and sometimes divergent changes in the water-electrolyte metabolism and renal functions. The loss of water and electrolytes by the body, recorded by bioimpedance methods in the course of hyperbaric factors, might result in dehydration. This, in turn, can increase the risk of developing specific divers’ disease, primarily such as decompression sickness. The studied literature does not provide clear guidelines on water-electrolyte balance correction in divers. Some works present data showing the possibility and usefulness of liquid intake (drinks) or pharmacological drugs, affecting divers’ water-electrolyte metabolism.

CONCLUSION. Analysis of literature data shows that specific changes of water-electrolyte metabolism and functions of excretory system emerge in the conditions of hyperbaric factors. In most subjects, these changes involve increased

diuresis, hypernatremia and reduced tissue hydration. In cases where the effect of the adverse hyperbaric factor led to the development of pathological changes, tissue hyperhydration and increasing concentration of potassium in the blood as well as reduction of sodium in the urine were observed. This could indicate the possibility of forming the specific phenomenon “pressure diuresis” in hyperbaric conditions. All changes, occurring in the body under the action of hyperbaric factors, should be considered in terms of individual resistance to these factors and primarily to decompression sickness. Studies of divers’ water-electrolyte metabolism and renal function in the conditions of adverse hyperbaric factors are relevant with a view to developing the system of correction measures and prevention of the revealed violations.

KEYWORDS: marine medicine, diver, pressure diuresis, decompression sickness, water-electrolyte metabolism, nitrogen toxic effect, oxygen toxic effect, hypoxic hypoxia

Введение. В многочисленных исследованиях в области гипербарической физиологии и водолазной медицины отмечены изменения водно-электролитного обмена, а также функций почек человека и животных при нахождении в условиях повышенного давления газовой и водной сред. Эти изменения в основном характеризуются увеличением диуреза и повышенной экскрецией с мочой различных веществ. Поэтому у большинства водолазов, особенно при многократных погружениях, отмечается снижение гидратации тканей организма, связанное с перемещением жидких сред [1–3].

Такие изменения напоминают перестройку водно-электролитного обмена у космонавтов, происходящую на заключительном этапе полета. [4]. У них наблюдалось уменьшение объема внеклеточной жидкости за счет падения объема циркулирующей крови и другие гемодинамические сдвиги. При этом развивается отрицательный баланс жидкости и повышается вероятность развития декомпрессионной болезни (ДБ) – заболевания, актуального как для водолазов, так и для космонавтов (летчиков) [5, 6].

Исследователи отмечали, что разнообразие параметров подводных погружений не сильно влияло на наблюдаемую картину изменений водно-электролитного обмена и гидратации тканей организма у водолазов [7]. Это, возможно, означает, что причины указанных нарушений водно-электролитного обмена надо искать не в длительности, глубине или частоте водолазных спусков и даже не в используемых при этом искусственных дыхательных смесях, а в других, в настоящее время недостаточно исследованных, факторах. Эти факторы должны присутствовать при всех (или в большинстве) водолазных погружений и оказывать комплексное воздействие на организм. В настоящее время к таким факторам относят повышенное давление газовой среды, определяемое величиной парциального давления газов, уровнем и пере-

падами общего давления, изменениями плотности, химического состава, теплопроводности и температуры дыхательной газовой смеси.

Результатом действия этих факторов может быть развитие декомпрессионного газообразования (ДГ), возникновение гипоксической гипоксии (ГГ), токсического действия азота (ТДА) и токсического действия кислорода (ТДК). Общеизвестно, что вероятность возникновения водолазных заболеваний (патологических состояний) при действии указанных факторов гипербарии определяется не только силой их действия, но и индивидуальной устойчивостью человека [5, 6, 8–10].

Поэтому мы считаем, что не только сами факторы гипербарии, но и индивидуальная устойчивость к ним может определять вектор и величину изменений водно-электролитного обмена человека при водолазных погружениях. При этом в более ранних и достаточно объемных работах многочисленных исследователей, касающихся изменений водно-электролитного обмена в условиях гипербарии, аспект индивидуальной устойчивости не освещен [7]. Более того, часто научные работы в данном направлении представляли собой констатацию фактов тех или иных изменений водно-электролитного обмена, не связывая их с заболеваниями водолазов и не раскрывая физиологических механизмов, лежащих в их основе, не говоря уже о возможностях профилактики [11].

Кроме того, в настоящее время актуальной для водолазной медицины является разработка косвенных способов определения устойчивости организма к факторам гипербарии, основанных на исследовании функций различных систем организма. Дело в том, что прямые способы определения устойчивости связаны с воздействием неблагоприятных факторов гипербарии на организм водолаза и не исключают развития легких форм заболеваний. Особенно это касается ДБ – заболевания часто встречающегося у

водолазов. В более ранних исследованиях нами было отмечено, что состояние водно-электролитного обмена отражает уровень функционирования не только выделительной системы, но и всего организма. Таким образом, состояние водно-электролитного обмена является важным показателем гомеостаза и будет отражать устойчивость человека к действию различных факторов гипербарии [12, 13].

Из всего вышеизложенного следует, что, несмотря на неоспоримое участие жидкости в процессах насыщения–рассыщения организма от индифферентного газа, а также в процессах поддержания осмотического гомеостаза, роль водно-электролитного обмена и функций почек в процессах адаптации к условиям гипербарии остается недостаточно исследованной.

Цель. На основании обзора литературы выявить механизмы и закономерности изменений водно-электролитного обмена и функций почек при действии факторов гипербарии.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели был проведен обзор работ из наукометрических баз данных и проанализированы запросы, полученные на различных сайтах при помощи поисковых систем eLibrary.ru, РИНЦ, Scopus, PubMed, Cochrane, Google Scholar, www.academickeys.com, Ulrichsweb, www.research4life.org, www.lens.org, www.cabi.org, rucont.ru, www.ebsco.com, www.mendeley.com, OpenCitations.net, unpaywall.org, xueshu.baidu.com, www.wikidata.org, na.neicon.ru, keepers.issn.org. Анализ выполняли по ключевым словам и словосочетаниям на русском и английском языках: водолаз, водно-электролитный обмен, выделительная система, функции почек, диурез, почка, токсическое действие азота, гипероксия, гипоксия, декомпрессионная болезнь, токсическое действие кислорода. Кроме того, исследовалась литература фундаментальной библиотеки Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова (Санкт-Петербург). Было проанализировано 155 литературных источников за 1975–2023 гг., из которых в обзор было включено 53 работы, соответствующие критериям включения и исключения. При этом из 53 включенных в обзор работ не менее 80 % были изданы в течение последних десяти лет. Включение в аналитический обзор работ, изданных более десяти лет назад, допускалось в случае, если это были первоисточники или они содержали высокоинформативные материалы (или обзоры).

Результаты. В большинстве исследованных нами работ содержится информация о нарастании диуреза в ходе подводных погружений у двух третей испытуемых. Если рассматривать многократные в течение суток водолазные спуски, то наибольшее усиление диуреза происходило вначале погружений при первых спусках. При анализе параметров диуреза в ходе спусков методом длительного пребывания под повышенным давлением выявлено, что наибольшее усиление диуреза происходит в первые часы или дни нахождения в условиях гипербарии. Но при этом в некоторых исследованиях существуют указания на то, что примерно у 1-2 испытуемых из 10 не только не происходит усиления мочеотделения, но даже наблюдается снижение диуреза [7, 14–17].

Кроме усиления диуреза исследователи отмечали увеличение выделения с мочой различных веществ, коррелировавшее с количеством образовавшейся мочи. В то же время в литературе не содержится указаний на рост потребления жидкости водолазами в гипербарических условиях, что может наводить на мысль о развивающейся в условиях гипербарии гипогидратации организма. В доступной литературе практически не содержится материалов, посвященных исследованиям потерь жидкости с калом или дыханием у водолазов [3, 7, 18–21].

Что касается влияния искусственных газовых дыхательных смесей (ИГДС) на гидратацию тканей организма и водно-электролитный обмен, то большинство источников указывает на снижение неощутимых потерь жидкости при применении ИГДС в процессе подводных погружений. Объясняется это прежде всего снижением скорости диффузии жидкости в легких, особенно если использовались ИГДС на основе гелия [7, 17, 18].

Часто увеличение диуреза сопровождалось снижением массы тела, которое никак не было связано с рационом питания или водопотреблением, что позволило авторам исследований прийти к выводу о дегидратации организма в условиях гипербарии [7]. Снижение массы тела имело прямую, сильную корреляционную связь с величиной окружающего давления и временем нахождения в таких условиях. Снижение массы тела наиболее выраженным было у экспериментальных животных. Для подтверждения возможности дегидратации организма в условиях гипербарии были проведены исследо-

вания, заключавшиеся в оценке осмолярности крови, которые показали ее снижение у некоторых испытуемых [20]. Конечно, при этом не анализировался состав дыхательных газовых смесей, действующие факторы гипербарии и устойчивость организма к этим факторам.

В других исследованиях был показан рост осмолярности крови крыс при полном насыщении организма индифферентными газами. Особенно этот эффект был выражен при дыхании азотом, в меньшей степени – гелием. Однако процессы, связанные с изменением гидратации и осмотического статуса, происходящие при насыщении (и особенно перенасыщении) тканей организма от индифферентного газа, исследованы не были [20].

Основная масса исследователей считает, что действие повышенного давления на систему дыхания является основополагающим фактором, влияющим на регуляцию объема крови и поддержание осмотического гомеостаза. В гипербарических условиях повышенная плотность дыхательной газовой смеси будет усиливать работу дыхательной системы за счет растяжения и сжатия тканей легких, которые в данных условиях будут формировать присасывающий эффект грудной клетки. Именно за счет этого механизма увеличивается приток венозной крови к сердцу, растет транспульмональное давление, растягиваются предсердия и увеличивается объем циркулирующей крови (ОЦК). В условиях нормобарии увеличение ОЦК вызывает активацию механизмов, подавляющих секрецию антидиуретического гормона (АДГ) и альдостерона, а также увеличивает выброс предсердного натрийуретического фактора (натрийуретического пептида).

Однако исследования, проведенные в условиях гипербарии, показали разнонаправленные результаты. В одних работах говорится о снижении количества АДГ и альдостерона в условиях гипербарии [14, 17], в других – приводятся результаты, свидетельствующие о резком росте содержания указанных гормонов в плазме крови или моче испытуемых [18, 19]. Однозначной трактовки указанного явления в исследованной литературе не приводится. В одних работах сообщается о влиянии стресса или гиперкалиемии [20], в других – о непосредственном действии факторов гипербарии на гипоталамо-гипофизарную систему, а в третьих – утверждается, что АДГ и альдостерон вооб-

ще не участвуют в регуляции водно-электролитного обмена в условиях гипербарии [19].

Так или иначе, но из всех факторов гипербарии в большинстве работ диоксид углерода или кислород указаны в качестве основных агентов, действующих на нейрогипофиз, гипоталамус и надпочечники, совершенно не затрагивая вопросов декомпрессионного газообразования. При рассмотрении гиперкапнии или гипероксии в качестве основного фактора, влияющего на регуляцию водно-электролитного обмена, большая часть исследователей сходятся во мнении, что не сам диоксид углерода или кислород будут влиять на гипоталамо-гипофизарную систему, а ацидоз, возникающий вследствие их действия, будет снижать секрецию АДГ и увеличивать диурез. Развитие ацидоза за счет уменьшения концентрации калия внутри клеток, будет способствовать снижению реакции организма на АДГ и развитию диуреза. Свой вклад в повышение диуреза будет вносить и увеличение содержания мочевины в крови за счет усиления процессов катаболизма при подводных погружениях [7].

Эффекты гипероксии на функции почек начали интересовать исследователей с момента активного использования кислорода в качестве лечебного средства. Полученные в ходе проведения сеансов оксигенотерапии данные показали, что не только сила, но и вектор действия кислорода на водно-электролитный обмен и функции почек будет зависеть как от дозы кислорода, так и от способа его введения в организм. Так, подкожное введение кислорода не влияло на уровень диуреза и концентрацию электролитов в моче [22]. Если биомеханика дыхания менялась за счет принудительной вентиляции легких, то отмечалось снижение диуреза. Но как только биомеханика дыхания восстанавливалась, дыхание кислородом сразу приводило к усилению диуреза и повышению выведения натрия с мочой у большинства испытуемых. Эффекты гипербарического кислорода на диурез чаще всего объясняются сосудосуживающим действием, которое, в свою очередь, определяется его дозой [22].

Кроме гипероксии многих исследователей интересовал вопрос влияния гипоксии на водно-электролитный обмен и функции почек. Этот интерес был обусловлен развитием горной, а также авиационной и космической медицины. Уже первые исследования выявили отсутствие

усиления кровотока в почке при развитии гипоксии ее тканей. Последующие работы показали, что это связано с необходимостью реабсорбции натрия. Именно процесс реабсорбции натрия требует высоких энергетических затрат, и повышенный кровоток в почке привел бы к запредельному их росту. В то же время многочисленные работы показывают усиление диуреза в условиях начинающейся гипоксии, которая способна приводить к дегидратации при продолжительном действии пониженного парциального давления кислорода на организм. При действии выраженной гипоксии уже регистрировалось снижение диуреза, приводившее к отекам и гипергидратации. Исследования в области горной медицины показали большие потери жидкости с дыханием и рассогласование работы РААС, приводящее к изменению электролитного состава плазмы крови [23–26].

Именно нарушения электролитного состава крови послужили толчком к исследованию изменений содержания калия, натрия и других веществ в крови и моче у водолазов. Такие работы проводились в СССР в рамках программ «Черномор» и «Ихтиандр», а в США и Японии – Seadragon, Seatopia и Hana Kai. В большинстве работ, опубликованных по материалам данных исследований, отмечаются гипернатриемия и увеличение гидратации тканей, обусловленные токсическим действием кислорода, пересыщением тканей организма индифферентными газами и токсическим действием азота. Причем совместное действие указанных факторов могло многократно увеличивать гипернатриемию, а замена воздуха и снижение парциального давления кислорода, за счет применения кислородно-гелиевых смесей, снижало уровень гипернатриемии [7, 27–29].

При гипернатриемии закономерным выглядит увеличение концентрации натрия в моче. В рассмотренных источниках по-разному трактуют механизмы гипербарической натрийурии. По мнению одних исследователей, причина гипернатрийурии – гипероксия или гипоксия, других – увеличение плотности дыхательной газовой смеси, повышение парциального давления азота или пересыщение тканей индифферентным газом, сопровождающееся ростом декомпрессионного газообразования [2, 7, 30, 31].

Все представленные в рассмотренной нами литературе концепции имеют право на существование, так как в их основе лежит форми-

рование ацидоза различных типов, который в конечном счете способствует увеличенному выведению натрия с мочой. Интересна также динамика выведения натрия с мочой, которая показывает рост его экскреции почками вплоть до величин давления, превышающего 2 МПа. Многие исследователи отмечали медленное восстановление увеличенной экскреции натрия с мочой, причем чем выше было давление, под которым находились испытуемые, тем медленнее восстанавливалась скорость экскреции натрия [20].

При этом в литературе описаны случаи, когда, несмотря на силу действующих факторов гипербарии, у каждого пятого испытуемого не отмечалось усиленной экскреции натрия с мочой, а регистрировалось даже снижение этого показателя. Конкретного объяснения указанному факту в доступной литературе обнаружить не удалось, но если суммировать все высказанные предположения, то речь может идти о снижении клубочковой фильтрации, повышении канальцевой реабсорбции или комбинации указанных механизмов. На эти процессы в гипербарических условиях могут влиять многие факторы. К ним можно отнести изменение скорости почечного кровотока, стрессовые ситуации или особенности адаптации к действию факторов гипербарии [7, 17, 20, 29].

Большинство исследователей считают, что в условиях гипербарии именно РААС и ее основной компонент альдостерон будут играть ключевую роль при изменениях водно-электролитного обмена. Известно, что альдостерон снижает экскрецию натрия с мочой, поэтому закономерно было бы предположить снижение уровня альдостерона в крови у испытуемых в условиях гипербарии. Однако в проанализированных работах отмечен рост концентрации этого гормона в плазме крови, а примерно у 15–20 % испытуемых его повышение было значительным. И опять-таки ясной трактовки указанного факта в литературе не представлено. Высказаны предположения об увеличении активности коры надпочечников, повышенной выработки адренокортикотропного гормона или изменения функций щитовидной железы. Вне зависимости от того, какие механизмы участвуют в стимуляции увеличения концентрации альдостерона в гипербарических условиях, сам по себе гиперальдостеронизм может приводить к нежелательным эффектам,

закрывающимся в конечном итоге в развитии патологических состояний сердечно-сосудистой системы, часто наблюдаемых у водолазов с большим стажем работ [7].

В исследованной литературе представлена информация о том, что почки в гипербарических условиях иногда не реагируют на увеличение концентрации альдостерона повышенной задержкой натрия. Причин этого явления приводится несколько. Так, не последнее место среди них занимает потеря чувствительности к альдостерону клетками почечных канальцев, происходящая из-за блокады минералокортикоидных рецепторов различными веществами. Вторая важная причина отсутствия реакции натрийуреза на альдостерон в условиях гипербарии может быть связана с возникновением более сильных натрийуретических факторов, что не позволяет тормозить выведение натрия почками. Первые данные о наличии таких натрийуретических факторов появились во время исследований, посвященных оценке функций организма при длительном нахождении в условиях гипербарии в сочетании с иммерсией, когда одновременно с высокой концентрацией натрия в моче обнаруживались и высокие показатели альдостерона в крови. Тогда было впервые высказано предположение о том, что высокая концентрация натрия в моче при иммерсии в условиях гипербарии обусловлена выделением натрийуретического пептида, являющегося антагонистом альдостерона [7, 17, 19, 20].

Другие исследователи указывают на возможную роль АДГ в усилении натрийуретических реакций при гипербарии и противопоставляют его действие эффектам альдостерона. Дальнейшее исследование роли АДГ в регуляции водно-электролитного обмена интересно еще и тем, что у него обнаружена масса «неклассических» эффектов, которые вполне могут проявляться в условиях гипербарии и никогда ранее не ассоциировались с действием повышенного давления на водно-электролитный обмен. Например, АДГ изменяет болевую чувствительность, что в последнее время выявляется у водолазов при пересыщении тканей индифферентным газом и развитии декомпрессионного газообразования [32]. Выявлено также, что АДГ способствует повреждению костей, увеличению свертываемости крови, развитию миокардиодистрофии и других признаков поражения сердечно-сосудистой системы, что часто обна-

руживается у болевших и не болевших ДБ водолазов с большим стажем работ [33, 34].

Имеются работы, в которых приводятся результаты исследований, указывающие на гипероксию как на причину повышенного натрийуреза у водолазов. Авторы связывали это с высокой чувствительностью процессов реабсорбции натрия к гипероксии, а также с усилением действия кислорода при введении минералокортикоидов. Возможно, именно эти механизмы лежат в основе снижения чувствительности клеток к альдостерону. В исследованной литературе присутствуют многочисленные данные, указывающие на возможность повреждения ткани почек при гипероксии и развитии оксидативного стресса, проявляющегося разрушением митохондрий, повреждением почечных канальцев и снижением скорости ферментативных реакций [7, 35–37].

В ходе анализа литературы, посвященной изменениям у водолазов содержания калия в крови и моче, мы столкнулись с большим разнообразием данных. Есть работы, в которых говорится о повышении уровня калия в крови при спусках на большие и малые глубины, в других исследованиях говорится о снижении его содержания в крови у водолазов. Причем в качестве обоснования как повышения, так и понижения уровня калия в крови у водолазов представлены самые разные и порой взаимоисключающие концепции. Так, в некоторых работах продемонстрированы данные, указывающие на повышение активности поджелудочной железы, приводящие к переходу калия в клетки и снижению его содержания в плазме крови [30].

В других работах сообщается о повышении уровня калия в крови, связанном с возникновением ацидоза при развитии гипероксии или токсическом действии азота [27, 28]. Причем при использовании ИГДС с пониженным парциальным давлением азота и кислорода уровень гиперкалиемии у водолазов снижался. В то же время выведение калия с мочой имело сходную динамику с таковой у натрия и зависело от глубины погружения и времени нахождения под водой. Наиболее сильно уровень калия в моче у водолазов повышался в первые сутки нахождения в условиях гипербарии, а снижался через некоторое время после декомпрессии. Многие исследователи отмечали, что повышенное выведение калия с мочой сопровождалось снижением его концентрации в тканях и клетках и увеличе-

нием содержания в плазме крови, и связывали это с действием альдостерона [28, 29]. Известно, что альдостерон увеличивает выведение калия и усиливает реабсорбцию натрия за счет усиления активности натрий-водородного антипорта. В условиях нормобарии уменьшение секреции калия соответствует снижению реабсорбции натрия, однако в условиях гипербарии экскреция натрия и калия с мочой увеличиваются одновременно. Многие исследователи пытались найти объяснение этому явлению, но ответ был получен только после открытия в печени рецепторов, отвечающих за выведение калия. Оказалось, что гипероксия, которая снижает печеночный кровоток, будет активизировать выведение калия с мочой при пониженной реабсорбции натрия [7, 17, 19, 22, 38, 39].

Если рассматривать изменения фосфорного и кальциевого обмена в условиях гипербарии, то, анализируя данные литературных источников, достаточно сложно сделать какие-либо определенные выводы. Даже учитывая высокую частоту развития у водолазов асептического (дисбарического) остеонекроза, исследований в этом направлении в настоящее время проведено явно недостаточно. Понятно, что при физическом нарушении структуры костей из них должен уходить кальций и фосфор, чего не наблюдается даже при многодневном нахождении в условиях гипербарии. Отмечается лишь увеличение их концентрации в плазме крови при декомпрессии. Для объяснения механизмов изменений фосфорного и кальциевого обмена следует обратить внимание на «неклассические» эффекты АДГ, так как этот гормон контролирует метаболизм костной ткани и способен активизировать деятельность остеокластов [34, 40].

Ранее нами были получены результаты, указывающие на повышенную концентрацию АДГ в плазме испытуемых, имеющих низкую и среднюю устойчивость к факторам гипербарии и особенно к декомпрессионному газообразованию. Поэтому не исключено, что проблему дисбарического остеонекроза у водолазов необходимо связывать с высоким уровнем декомпрессионного газообразования и нарушениями водно-электролитного обмена, возникающими при этом [13, 41].

Что касается содержания хлоридов в плазме крови и моче водолазов, то в большинстве работ отмечается увеличение концентрации этого

электролита, что обычно связывают с возникновением гиповолемии, ростом декомпрессионного газообразования или другими невыясненными причинами [30, 42].

Обсуждение. Нахождение в условиях повышенного давления газовой и водной сред сопровождается многочисленными и порой разнонаправленными изменениями в водно-электролитном обмене и функциях почек. При этом в большинстве случаев указанные изменения проявляются нарастанием диуреза, развитием отрицательного водного баланса, потерей электролитов и изменением гидратации тканей после различных по глубине, длительности, интенсивности и другим параметрам подводных погружений [7, 43]. Потеря воды и электролитов организмом, регистрируемая биоимпедансными методами в ходе действия факторов гипербарии, может приводить к дегидратации [3, 7]. Это в свою очередь может увеличивать риск развития специфических заболеваний водолазов, прежде всего таких, как ДБ. При этом, как известно, проблема ДБ актуальна не только для водолазной (морской), но и для авиационной (космической) медицины. Многочисленные исследования подтверждают важность диагностики и коррекции водно-электролитного обмена у космонавтов для повышения их устойчивости к факторам полета, при этом в водолазной медицине такие работы отсутствуют, но имеются единичные указания на возможность развития ДБ при нарушении водного баланса организма водолазов [5, 6, 11, 44].

Возможно, что многочисленные изменения в водно-электролитном обмене, диурезе и гидратации тканей организма водолазов условно можно объединить в специфический физиологический симптомокомплекс – феномен «диуреза давления» (или «диурез водолаза», «гипербарический диурез»). Проведенные нами исследования показали, что проявления этого феномена будут заключаться в повышенной экскреции калия и натрия с мочой, усилении диуреза, развитии гиперкалиемии и гипернатриемии у большинства водолазов, устойчивых к действию факторов гипербарии. Наибольшее число устойчивых испытуемых было выявлено при определении устойчивости к ДБ [45].

Если рассматривать указанный феномен, то крайне важно выявить физиологические механизмы его возникновения и определить, какую физиологическую роль в условиях гипербарии

он играет. Кроме того, нет никаких данных, характеризующих (или обосновывающих) снижение диуреза, уменьшение количества натрия в моче после (и в процессе) спусков под воду у 10–20 % обследованных испытуемых-водолазов. Такие факты прослеживаются в исследованной литературе и наводят на мысль о рассогласовании физиологических механизмов, участвующих в формировании вторичной мочи при подводных погружениях у части испытуемых.

Изменения гидратации тканей, показателей осмотического гомеостаза, водно-электролитного обмена и функций выделительной системы почти всегда оценивали при действии комплекса факторов гипербарии. Вследствие этого провести адекватную дифференцировку эффектов, возникающих при действии конкретного фактора гипербарии, не всегда представляется возможным. В доступной литературе не удалось обнаружить данных, указывающих на изменения водно-электролитного обмена и функций почек при действии каждого отдельного фактора гипербарии. При подвондн : погружениях к таким факторам в первую очередь относят факторы повышенного давления газовой среды, определяемые величиной парциального давления газов, уровнем и перепадами общего давления, изменениями плотности, химического состава, теплопроводности и температуры дыхательной газовой смеси. Эти факторы формируют специфические условия труда водолазов, влияют на их функциональное состояние и работоспособность. При превышении допустимых параметров результатом действия этих факторов может быть развитие различных водолазных заболеваний [46–49].

Кроме того, при исследованиях не учитывалась индивидуальная устойчивость испытуемых водолазов и экспериментальных животных к факторам гипербарии, а ведь она может варьировать в значительных пределах. Возможно, именно с этим связана противоречивость данных и отсутствие во многих ранних исследованиях связи уровня альдостерона в плазме крови и выделения натрия с мочой, активности РААС и содержания калия в крови и моче, а также многих других выявленных изменений в водно-электролитном обмене у водолазов. Некоторые исследователи прямо указывают на индивидуальные различия гормональных сдвигов и биохимических показателей крови и мочи у испытуемых, подвергавшихся влиянию

гипербарии, однако трактовки указанных изменений не приводят и группы испытуемых по устойчивости к факторам гипербарии не выделяют [46–50].

В исследованной литературе не содержится и четких рекомендаций по коррекции водно-электролитного баланса у водолазов. Хотя в некоторых работах, в основном зарубежных, представлены данные, указывающие на возможность приема жидкостей (напитков) или фармакологических препаратов, влияющих на водно-электролитный обмен водолазов [51, 52].

Так, в некоторых работах сообщается о возможности и даже необходимости приема перед подводным погружением напитков, содержащих хлорид натрия в различных концентрациях. Обоснованием применения указанных напитков служит необходимость задержки жидкости в организме и профилактика гипогидратации у водолазов. При этом предлагаемые способы приема и дозировки указанных напитков, да и сами напитки были подобраны эмпирическим путем. В этих исследованиях не представлено физиологическое обоснование приема данных веществ с целью коррекции нарушений водно-электролитного обмена и функций выделительной системы у водолазов, хотя указывается на безусловную полезность приема таких напитков при подводных погружениях [39, 53]. Это обосновывает необходимость проведения дополнительных исследований по выявлению нарушений водно-электролитного обмена при водолазных погружениях и разработке методов их коррекции.

Заключение. Анализ данных литературы и собственные исследования показали, что в условиях действия факторов гипербарии возникают изменения водно-электролитного обмена и функций выделительной системы. У большинства испытуемых эти изменения заключаются в усилении диуреза, гипернатриемии и снижении гидратации тканей. В тех случаях, когда влияние неблагоприятных факторов гипербарии на лиц, имевших низкую устойчивость к ним, приводило к развитию декомпрессионного газообразования, токсическому действию кислорода или гипоксии, часто отмечались гипергидратация тканей и нарастание концентрации в крови калия, а также снижение содержания натрия в моче. У лиц, имевших низкую устойчивость к факторам гипербарии, снижалось и количество выводимой мочи. Это,

на наш взгляд, может указывать на возможность формирования в условиях гипербарии специфического феномена «диуреза давления» у лиц, имевших высокую устойчивость к действию факторов гипербарии. При многообразии указанных изменений механизмы возникновения «диуреза давления» еще недостаточно изучены, что предполагает проведение исследований в указанном направлении. Наибольшую выраженность таких изменений выявляли при возникновении декомпрессионного газообразования, что подчеркивает важность проблемы профилактики ДБ в современных условиях.

В работах последних лет показана необходимость контроля параметров водно-электролитного обмена и функций выделительной системы для профилактики декомпрессионного газообразования и в меньшей степени – токсического действия кислорода [30]. Что касается остальных факторов гипербарии (например, гиперкапнии и гипоксии), то в исследованной литературе есть только косвенные упоминания о необходимости учета параметров водно-электролитного обмена при развитии гипоксической гипоксии, возникающей при подъеме в горы.

Таким образом, исследования водно-электролитного обмена и функций почек водолазов в условиях действия неблагоприятных факторов гипербарии актуальны при определении их закономерностей и механизмов, что позволит разработать систему мер коррекции и профилактики выявленных нарушений. На наш взгляд, изменения в водно-электролитном обмене, происходящие при развитии декомпрессионного газообразования, могут быть взяты за основу формирования модели нарушений, происходящих при действии различных факторов гипербарии, а затем использованы для разработки системы их профилактики.

Мы считаем, что все изменения, происходящие в организме под действием факторов гипербарии, необходимо рассматривать с позиций индивидуальной устойчивости к этим факторам и в первую очередь к ДБ. Это касается не только водно-электролитного обмена и функций почек, но и других функций организма. Поэтому научные изыскания в области гипербарической физиологии и водолазной медицины должны начинаться с определения индивидуальной устойчивости организма к тем факторам, которые будут ведущими при последующих исследованиях. Это в дальнейшем позволит сформировать группы показателей функций организма, которые у испытуемых с разной устойчивостью будут изменяться по-разному, и выявить определенные их сочетания. Впоследствии это может стать основой формирования концепции «гипербарической устойчивости». Эта концепция предполагает выявление совокупности признаков организма, определяющей устойчивость ко многим факторам гипербарии. Развитие данной концепции позволит глубже изучить механизмы гипербаропопоражаемости и проводить косвенную оценку устойчивости организма к факторам гипербарии без воздействия на организм самих факторов.

Что же касается водно-электролитного обмена, то, на наш взгляд, этот вид обмена будет занимать основное место среди механизмов, определяющих гомеостазис в гипербарических условиях, а его роль в концепции «гипербарической устойчивости» будет решающей. Разработка методов диагностики и коррекции водно-электролитного обмена позволит расширить арсенал методик, способствующих повышению устойчивости водолазов к факторам гипербарии.

Сведения об авторах:

Шитов Арсений Юрьевич – кандидат медицинских наук, заслуженный изобретатель Российской Федерации, старший преподаватель кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова»; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; SPIN: 7390-1240; ORCID: 0000-0002-5716-0932; Researcher ID: O-3730-2017; e-mail: arseniyshitov@mail.ru

Зверев Дмитрий Павлович – кандидат медицинских наук, доцент, начальник кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; SPIN: 7570-9568; ORCID: 0000-0003-3333-6769; e-mail: z.d.p@mail.ru

Мясников Алексей Анатольевич – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, профессор кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; SPIN: 2590-0429; ORCID: 0000-0002-7427-0885; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru

Кленков Ильяс Рифатьевич – кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; SPIN: 9827-8535; ORCID: 0000-0002-1465-1539; e-mail: klen.ir@mail.ru

Андрусенко Андрей Николаевич – кандидат медицинских наук; преподаватель кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; научный сотрудник, Научно-исследовательский институт промышленной и морской медицины ФМБА России; 196143, Санкт-Петербург, пр-т Юрия Гагарина, д. 65; SPIN: 6772-4452; ORCID: 0000-0001-7393-6000; e-mail: an.a.an@mail.ru

Исрафилов Загир Маллараджабович – преподаватель кафедры физиологии подводного плавания, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; SPIN: 1619-6621; ORCID: 0000-0002-3524-7412; e-mail: warag05@mail.ru

Колчанов Сергей Павлович – адъюнкт, Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6. e-mail: kolchans@yandex.ru

Information about the authors:

Arseniy Yu. Shitov – Cand. of Sci. (Med.), Honored Inventor of the Russian Federation, Senior lecturer of the Department Physiology of Scuba Diving, Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; SPIN: 7390-1240; ORCID: 0000-0002-5716-0932; Researcher ID: O-3730-2017; e-mail: arseniyshitov@mail.ru

Dmitry P. Zverev – Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Colonel of the Medical Service, Head of the Department Physiology of Scuba Diving, Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; SPIN: 7570-9568; ORCID: 0000-0003-3333-6769; e-mail: zd.p@mail.ru

Alexey A. Myasnikov – Dr. of Sci. (Med.), Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Professor of the Department Physiology of Scuba Diving, Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; SPIN: 2590-0429; ORCID: 0000-0002-7427-0885; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru

Ilyas R. Klenkov – Cand. of Sci. (Med.), Senior lecturer of the Department Physiology of Scuba Diving of Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; SPIN: 9827-8535; ORCID: 0000-0002-1465-1539; e-mail: klen.ir@mail.ru

Andrey N. Andrusenko – Cand. of Sci. (Med.), Lecturer of the Department Physiology of Scuba Diving, Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; Research associate Scientific research institute of industrial and marine medicine Federal Medical and Biological Agency of Russia; SPIN: 6772-4452; ORCID: 0000-0001-7393-6000; e-mail: an.a.an@mail.ru

Zagir M. Israfilov – Lecturer of the Department Physiology of Scuba Diving, of Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; SPIN: 1619-6621; ORCID: 0000-0002-3524-7412; e-mail: warag05@mail.ru

Sergey P. Kolchanov – Adjunct of the Department Physiology of Scuba Diving, Military Medical Academy named after S. M. Kirov; 194044, Saint Petersburg, Academician Lebedev Str., 6; e-mail: kolchans@yandex.ru

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). *Наибольший вклад распределен следующим образом.* Вклад в концепцию и план исследования — А. Ю. Шитов, А. А. Мясников, Д. П. Зверев. Вклад в сбор данных — А. Ю. Шитов, А. Н. Андрусенко. Вклад в анализ данных и выводы — С. П. Колчанов, З. М. Исрафилов, И. Р. Кленков. Вклад в подготовку рукописи — А. Ю. Шитов, А. Н. Андрусенко, И. Р. Кленков.

Author contribution. All authors according to the ICMJE criteria participated in the development of the concept of the article, obtaining and analyzing factual data, writing and editing the text of the article, checking and approving the text of the article.

Special contribution: AYS, AAM, DPZ contribution to the concept and plan of the study. AYS, ANA contribution to data collection. SPK, ZMI, IRK contribution to data analysis and conclusions. AYS, ANA, IRK contribution to the preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Соответствие принципам этики: Одобрение этического комитета не требовалось. Каждый респондент (испытуемый) дал добровольное согласие на обработку своих персональных данных в ходе проводимого исследования.

Adherence to ethical standards: The approval of the ethics committee was not required. Each respondent (subject) gave voluntary consent to the processing of their personal data during the study.

Финансирование: исследование проведено без дополнительного финансирования.

Funding: the study was carried out without additional funding.

Поступила/Received: 12.04.2023

Принята к печати/Accepted: 15.05.2024

Опубликована/Published: 30.06.2024

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Wekre S. L., Landsverk H. D., Lautridou J., Hjelde A., Imbert J. P., Balestra C., Eftedal I. Hydration status during commercial saturation diving measured by bioimpedance and urine specific gravity // *Front Physiol.* 2022. No 13. pp. 971757. doi: 10.3389/fphys.2022.971757.
2. Kaczerska D., Siermontowski P., Kozakiewicz M., Krefft K., Olszański R. Dehydration of a diver during a hyperbaric chamber exposure with oxygen decompression // *Undersea Hyperb Med.* 2019. Vol. 46, No 2. pp. 185–188.

3. Sengun S., Uslu A., Aydin S. Application of multifrequency bioelectrical impedance analysis method for the detection of dehydration status in professional divers // *Medicina (Kaunas)*. 2012. Vol. 48, No 4. pp. 203–210. doi:10.3390/medicina48040029.
4. Носков В. Б. Коррекция уровня гидратации организма на различных этапах космического полета // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2003. Т.37, № 2. с. 19–22 [Noskov V. B. Correction of the human body hydration in different periods of space flight // *Aviation and Space and Environmental Medicine*. 2003. Vol. 37, No. 2. pp. 19–22 (In Russ.)].
5. Благинин А. А., Жильцова И. И., Емельянов Ю. А. Вопросы декомпрессионной безопасности лётного состава // *Военно-медицинский журнал*. 2017. Т. 338, № 7. с. 42–45. [Blagin A. A., Zhiltsova I. I., Emelyanov Yu. A. Issues on decompression safety of flight crew // *Military Medical Journal*. 2017. Vol. 338, No 7. p. 42–45 (In Russ.)].
6. Sundal E., Lygre S.H.L., Irgens Å., Troland K., Grønning M. Long-term neurological sequelae after decompression sickness in retired professional divers // *Journal of the Neurological Sciences*. 2022. Vol. 434. p. 120181. doi:10.1016/j.jns.2022.120181.
7. Григорьев А. И., Николаев С. О., Орлов О. И., Семенов В. Ю., Перфильева Т. А. Влияние гипербарии на водно-солевой обмен // *Бюллетень Космическая биология и медицина*. 1985. № 2-3. с. 3–44 [Grigoriev A. I., Nikolaev S. O., Orlov O. I., Semenov V. Yu., Perfilova T. A. The effect of hyperbaria on water-salt metabolism // *Bulletin Space Biology and Medicine*. 1985. No 2-3. pp. 3-44 (In Russ.)].
8. Мясников А. А., Старков А. В., Старовойт А. В. Избранные вопросы водолазной медицины. СПб.: РИЦ ПСПбГМУ, 2019. 59 с. [Myasnikov A. A., Starkov A. V., Starovoit A. V. Selected issues of diving medicine. St. Petersburg: RIC PSPb-SMU, 2019. 59 p. (In Russ.)].
9. Мясников А. А. Устойчивость организма к декомпрессионной болезни и методы её повышения. СПб.: МАПО, 2009. 47 с. [Myasnikov A. A. The body's resistance to decompression sickness and methods of its improvement. St. Petersburg: MAPO, 2009. 47 p. (In Russ.)].
10. Мясников А. А. Профессиональная патология специалистов Военно-морского флота // *Патофизиология: руководство для слушателей и врачей Военно-медицинской академии и Военно-медицинских институтов* / Под ред. В. Ю. Шанина, СПб.: ЭЛБИ-СПб, 2005. 639 с. [Myasnikov A. A. Professional pathology of Navy specialists // *Pathophysiology: a guide for students and doctors of the Military Medical Academy and Military Medical Institutes* / Edited by V.Yu. Shanin, St. Petersburg: ELBI-SPb, 2005. 639 p. (In Russ.)].
11. Случай тяжелой декомпрессионной болезни у водолаза из-за нарушения режима декомпрессии и водного баланса // *Военно-медицинский журнал*. 2017. Т. 338, № 6. с. 71 [A case of severe decompression sickness in a diver due to a violation of the decompression regime and water balance // *Military Medical Journal*. 2017. Vol. 338, No 6. p. 71 (In Russ.)].
12. Зверев Д. П., Мясников А. А., Шитов А. Ю., Андрусенко А. Н., Чернов В. И., Кленков И. Р. Водно-электролитный обмен и функции выделительной системы у водолазов: новые подходы к определению устойчивости к декомпрессионной болезни // *Воен.-мед. журн.* 2018. Т. 339, № 4. С. 42–48 [Zverev D. P., Myasnikov A. A., Shitov A. Yu., Andrusenko A. N., Chernov V. I., Klenkov I. R. Water-electrolyte metabolism and excretory system functions in divers: new approaches to determination of dysbarism resistance // *Military Medical Journal*. 2018. Vol. 339, No 4. p. 42–48 (In Russ.)].
13. Зверев Д. П., Мясников А. А., Шитов А. Ю., Андрусенко А. Н., Чернов В. И., Исрафилов З. М., Кленков И. Р. Влияние факторов повышенного давления газовой среды на состояние водно-электролитного обмена организма при водолазных спусках // *Военно-медицинский журнал*. 2022. Т. 343, № 9. С. 49–60 [Zverev D. P., Myasnikov A. A., Shitov A. Yu., Andrusenko A. N., Chernov V. I., Israfilov Z. M., Klenkov I. R. Influence of factors of increased pressure of the gaseous medium on the state of water-electrolyte metabolism of the body during diving descents // *Military Medical Journal*. 2022. Vol. 343, No 9. p. 49–60 (In Russ.)]. doi: 10.52424/00269050_2022_343_9_49
14. Sagawa S., Claybaugh J. R., Shiraki K., Park Y. S., Mohri M., Hong S. K. Characteristics of increased urine flow during a dry saturation dive at 31 ATA // *Undersea Biomed Res.* 1990. № 17. p. 13–22.
15. Dronjak S., Jezova D., Kvetnansky R. Different effects of novel stressors on sympathoadrenal system activation in rats exposed to long-term immobilization // *Ann NY Acad Sci.* 2004. 1018. p. 113–123. doi: 10.1196/annals.1296.013
16. Mrakic-Sposta S., Vezzoli A., D'Alessandro F., Paganini M., Dellanoce C., Cialoni D. Change in oxidative stress biomarkers during 30 days in saturation dive: a pilot study // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17, No 19. pp. E7118. doi: 10.3390/ijerph17197118.
17. Hong S. K., Claybaugh J. R., Flattali V. Hana Kai II: a 17-day dry saturation dive at 18,6 ATA. Body fluid balance // *Undersea Biomed. Res.* 1977. Vol. 4, № 3. P. 247–265.
18. Hong S. K., Claybaugh J. R., Flattali V. Fluid balance during a 24-day dry heliox saturation dive to 18,6 ATA (Hana Kai II) // *Undersea Biomed. Res.* 1976. Vol. 3, № 1. P. 25–26.
19. Neuman T. S., Goad R. F., Hall D. Urinary excretion of water and electrolytes during open-sea saturation diving to 850 fsw // *Undersea Biomed. Res.* 1979. Vol. 6, № 3. P. 291–302.
20. Raymond L. W., Raymond N. S., Frattali V. P. In the weight loss of hiperbaric habitation a disorder of osmoregulation? // *Aviat. Space. Environ. Med.* 1980. Vol. 51, № 4. P. 397–401.
21. Денисенко Д. В., Проскурина Е. Ф., Шаркова К. С. Значение питьевого режима спортсменов, потеря воды и восполнение во время соревнований // *Дневник науки*. 2019. Т. 35, № 11. С. 5 [Denisenko D. V., Proskurina E. F., Sharkova K. S. Value of drinking mode of athletes, loss of water and replenishment during competitions // *Dnevnik nauki*. 2019. Vol. 35, No 11. p. 5 (In Russ.)]
22. Молчанов Д. В. *Почки при гипероксии*. М.: Бином, 2015. 160 с. ISBN 978-5-9518-0640-6 [Molchanov D. V. *Buds during hyperoxia*. Moscow: Binom, 2015. 160 p. (In Russ.)].

23. Hildebrandt W. Diuretic effect of hypoxia, hypocapnia, and hyperpnea in humans: relations to hormones and O₂ hemoglobin sensitivity // *J. Appl. Physiol.* 2000. Vol. 88. P. 599–610.
24. Robach P., Dechaux M., Jarrot S., et al. Operation Everest III: role of plasma volume expansion on O₂max during prolonged high altitude exposure // *Appl. Physiol.* 2000. Vol. 89. P. 29–37.
25. Мельников В. Н., Донгак А. О., Кривошеков С. Г., Айзман Р. И. Показатели гемодинамики у молодых мужчин при действии водной нагрузки в сочетании с кратковременной гипоксией // *Бюллетень СО РАМН.* 2007. № 3 (125). С. 159–162 [Melnikov V. N., Dongak A. O., Krivoshechekov S. G., Aizman R. I. An influence of water load with and without short-term acute normobaric hypoxia upon peripheral blood flow in young men // *The Bulletin of Siberian Branch of Russian Academy of Medical Sciences.* 2007. No 3 (125). p. 159–162 (In Russ.)].
26. Loeppky J. A., Icenogle M. V., Maes D., et al. Early fluid retention and severe acute mountain sickness // *J. Appl. Physiol.* 2005. Vol. 98. P. 591–597.
27. Konda N., Shiraki K., Takeuchi H., Nakayama H., Hong S. K. Seadragon VI: a 7-day dry saturation dive at 31 ATA. IV. Circadian analysis of body temperature and renal functions. *Undersea Biomed. Res.* 1987. 14(5). 413–423.
28. Matsuda M., Nakayama H., Kurata F. K. Physiology of man during 10-day dry heliox saturation vire (Seatopia) to 7 ATA II. Urinary water, electrolytes, ADH, and aldosterone // *Undersea Biomed. Res.* 1975. Vol. 2, № 2. P. 119–131.
29. Nakayama H., Hong S. K., Claybaugh J. R. Energy and body fluid balance during a 14-day dry saturation dive at 31 ATA (Seadragon IV) // *Undersea Physiology VII. Proc. 7th Symp. on Underwater Physiology* Ed. A. J. Bachrach, Matzen M. M: Undersea Med. Soc., Inc., Bethesda, Maryland. 1981. P. 541–554.
30. Бычков С. А., Зверев Д. П., Кленков И. Р., Ярков А. М., Исрафилов З. М. Биохимический статус у водолазов-глубоководников после воздействия факторов водной среды // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях.* 2022. № 4. С. 76–82 [Bychkov S. A., Zverev D. P., Klenkov I. R., Yarkov A. M., Israfilov Z. M. Biochemical effects in deep-sea divers exposed to aquatic environmental factors // *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations.* 2022. № 4. P. 76–82. (In Russ.)]. doi: 10.25016/2541-7487-2022-0-4-76-82
31. Simsek K., Ozler M., Yildirim O. A., Sadir S., Demirbas S., Oztosun M., Korkmaz A., Ay H., Oter S., Yildiz S. Evaluation of the Oxidative Effect of Long-Term Repetitive Hyperbaric Oxygen Exposures on Different Brain Regions of Rats // *The Scientific World Journal.* 2012. Vol. 2012. 849183 doi: 10.1100/2012/849183.32. Алпатов В. Н., Ганапольский В. П., Родичкин П. В., Ганапольская М. В. Математическая модель прогноза безболевого течения декомпрессионной болезни у спортивных дайверов // *Теория и практика физической культуры.* 2020. № 11. С. 32–34. [Alpatov V. N., Ganapolsky V. P., Rodichkin P. V., Ganapolskaya M. V. Mathematical model to predict painless decompression illness in competitive diving // *Theory and Practice of Physical Culture.* 2020. № 11. P. 32–34 (In Russ.)].
33. Наточин Ю. В. Вазопрессин: механизм действия и клиническая физиология // *Проблемы эндокринологии.* 2003. Т. 49, № 2. С.43–49 [Natochin Yu. V. Vasopressin: mechanism of action and clinical physiology // *Problems of Endocrinology.* 2003. Vol. 49, № 2. P. 43–50 (In Russ.)]. doi: 10.14341/probl11534
34. Тюзиков И. А., Калинин С. Ю., Ворслов Л. О., Тишова Ю. А. Вазопрессин: неклассические эффекты и роль в патогенезе ассоциированных с возрастом заболеваний // *Эффективная фармакотерапия.* 2015. № 26. С. 38–50 [Tyuzikov I. A., Kalinchenko S. Yu., Vorslov L. O., Tishova Yu. A. Vasopressin: non-classic effects and role in pathogenesis of age-associated diseases // *Effective pharmacotherapy.* 2015. № 26. P. 38–50 (In Russ.)].
35. Чеснокова Н. П., Понукалина Е. В., Жевак Т. Н., Афанасьева Г. А., Бизенкова М. Н. Роль надпочечников в регуляции водно-солевого гомеостаза в условиях нормы и патологии // *Научное обозрение. Медицинские науки.* 2016. № 1. С. 61–64 [Chesnokova N. P., Ponukalina E. V., Zhevack T. N., Afanasyeva G. A., Bizenkova M. N. The role of the adrenal glands in the regulation of water-salt homeostasis in the conditions of norm and pathology // *Scientific Review. Medical sciences.* 2016. No. 1. P. 61–64 (In Russ.)].
36. Орлов Ю. П., Говорова Н. В., Лукач В. Н., Кондратьев А. И., Какуля Е. Н., Климентьев А. В., Байтугаева Г. А., Глущенко А. В., Цилина С. В., Хиленко И. А. Гипероксия в ОРИТ и что изменилось через 100 лет в тактике использования кислорода в медицине: обзор литературы // *Вестник интенсивной терапии им. А.И. Салтанова.* 2022. № 2. С. 80–94 [Orlov Yu. P., Govorova N. V., Lukach V. N., Kondratyev A. I., Kakulya E. N., Klementyev A. V., Baytugaeva G. A., Tsilina S. V., Glushchenko A. V., Khilenko I. A. Hyperoxia in the ICU and what has changed in 100 years in the tactics of using oxygen in medicine: a review // *Annals of Critical Care.* 2022. № 2. P. 80–94 (In Russ.)]. doi: 10.21320/1818-474X-2022-2-80-94.
37. Надеев А. Д., Гончаров Н. В. Активные формы кислорода в клетках сердечно-сосудистой системы // *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2014. № 4. С. 80–94 [Nadeev A. D., Goncharov N. V. Reactive oxygen species in the cells of cardiovascular system // *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2014. № 4. P. 80–94 (In Russ.)]. doi: 10.17802/2306-1278-2014-4-80-94.
38. Hope A., Brekken R. A subjective evaluation of a drinking system for saturation divers // *Diving Hyperb. Med.* 2010. Vol. 40, № 1. P. 8–10.
39. Gempp E., Blatteau J. E., Pontier J. M., Balestra C., Louge P. Preventive effect of pre-dive hydration on bubble formation in divers // *Br J Sports Med.* 2009. Vol. 43, № 3. P. 224–228. doi: 10.1136/bjism.2007.043240.
40. Tamma R., Sun L., Cuscito C., et al. Regulation of bone remodeling by vasopressin explains the bone loss in hyponatremia // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2013. Vol. 110, № 46. P. 18644–18649.
41. Зверев Д. П., Мясников А. А., Шитов А. Ю., Чернов В. И., Андрусенко А. Н., Кленков И. Р., Исрафилов З. М. Гормональные механизмы регуляции водно-электролитного обмена у водолазов // *Известия Российской Военно-медицинской академии.* 2021. Т. 40, № S2. С. 51–56 [Zverev D. P., Myasnikov A. A., Shitov A. Yu., Chernov V. I., Andrusenko

- A. N., Klenkov I. R., Israfilov Z. M. Hormonal mechanisms of regulation of water-electrolyte exchange of divers // *Russian Military Medical Academy reports*. 2021. Vol. 40, № S2. P. 80–94 (In Russ.).
42. Wang Q., Guerrero F., Theron M. Pre-hydration strongly reduces decompression sickness occurrence after a simulated dive in the rat // *Diving Hyperb. Med.* 2020. Vol. 50, N 3. P. 288–291. doi: 10.28920/dhm50.3.288-291.
43. Vallee N., Desruelle A. V., Boussuges A., Rives S., Risso J. J., Dugrenot E., Guernec A., Guerrero F., Tardivel C., Martin J. C. Evidence of a hormonal reshuffle in the cecal metabolome fingerprint of a strain of rats resistant to decompression sickness // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, No 1. pp. 3–17. doi: 10.1038/s41598-021-87952-y.
44. Fahlman A., Dromsky D. M. Dehydration effects on the risk of severe decompression sickness in a swine model // *Aviat. Space Environ. Med.* 2006. Vol. 77, № 2. pp.102–106.
45. Зверев Д. П., Шитов А. Ю., Мясников А. А., Андрусенко А. Н., Чернов В. И., Кленков И. Р., Исрафилов З. М. Феномен «диуреза давления»: механизмы возникновения и физиологическое значение в практике медицинского обеспечения водолазов: проспективное когортное исследование // *Морская медицина*. 2023. Т. 9, № 1. С. 73–86 [Zverev D. P., Shitov A. Yu., Myasnikov A. A., Andrusenko A. N., Chernov V. I., Klenkov I. R., Israfilov Z. M. «Pressure diuresis» phenomenon: mechanisms and physiological significance in diving medical support practice: prospective cohort study // *Marine Medicine*. 2023. Vol. 9, No 1, pp. 73–86 (In Russ.). doi: 10.22328/2413-5747-2023-9-1-73-86.
46. Голубев В. Н., Королев Ю. Н., Мургаева Н. В., Стрельцова К. Г. Адаптивные реакции организма человека на воздействие гипоксии // *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2019. Т. 38, № 3. С. 178–182 [Golubev V. N., Korolev Yu. N., Murgaeva N. V., Strel'tsova K. G. Adaptive reactions of the human body to hypoxia // *Russian Military Medical Academy reports*. 2019. Vol. 38, No 3. pp. 178–182 (In Russ.).
47. Семенцов В. Н., Иванов И. В. Функциональные тесты для профессионального отбора водолазов и кессонщиков // *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2019. Т. 38, № 3. С. 207–216 [Sementsov V. N., Ivanov I. V. Functional tests for professional screening of divers and caissons // *Russian Military Medical Academy reports*. 2019. Vol. 38, No 3. pp. 207–216 (In Russ.).
48. Медведев Л. Г., Стаценко А. В., Апчел В. Я., Бакланов Д. В., Дмитрук В. И., Лупанов А. И. Механизм нарушений функций мозга при кислородном отравлении и азотном наркозе у водолазов и подводников // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2012. Т. 38, № 2. С. 74–78 [Medvedev L. G., Statsenko A. V., Apchel V. Ya., Baklanov D. V., Dmitryuk A. I., Lupanov A. I. The mechanism of disorders of the brain in oxygen poisoning and nitrogen narcosis in divers and submariners // *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2012. Vol. 38, No 2. pp. 74–78 (In Russ.).
49. Яхонтов Б. О. Физиологические факторы, лимитирующие глубину водолазных погружений // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019. № 7. С. 23–30 [Yakhontov B. O. Physiological factors limiting the depth of diving dives // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019. No. 7. pp. 23–30 (In Russ.). doi: 10.17513/mjpf.12793.
50. Попова Ю. А., Буравкова Л. Б., Павлов Б. Н. Метаболические и гормональные показатели крови человека при длительном пребывании в барокамере по режиму лечебной рекомпрессии // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2005. Т. 39, № 5. С. 31–36 [Popova Yu. A., Buravkova L. B., Pavlov B. N. Metabolic and hormonal parameters of humans during long-term hyperbaric exposure (the recompression treatment table) // *Aerospace and environmental medicine*. 2005. Vol. 39, No 5. pp. 31–36 (In Russ.).
51. Deb S. K., Swinton P. A., Dolan E. Nutritional considerations during prolonged exposure to a confined, hyperbaric, hyperoxic environment: recommendations for saturation divers // *Extrem Physiol Med.* 2016. №. 5. P. 1. doi: 10.1186/s13728-015-0042-9
52. Benardot D., Zimmermann W., Cox G. R., Marks S. Nutritional recommendations for divers // *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2014. Vol. 24, № 4. pp. 392–403. doi: 10.1123/ijsnem.2014-0012
53. Lalieu R. C., Akkerman I., Am van Ooij P. J., Boersma-Voogd A. A., A van Hulst R. Nutritional status of patients referred for hyperbaric oxygen treatment; a retrospective and descriptive cross-sectional study // *Diving Hyperb Med.* 2021. Vol. 51, № 4. pp. 322–327. doi: 10.28920/dhm51.4.322-327