

МЕХАНИЗМЫ НАРУШЕНИЙ ВОДНО-ЭЛЕКТРОЛИТНОГО ОБМЕНА ПРИ ДЕЙСТВИИ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ФАКТОРОВ ГИПЕРБАРИИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИХ КОРРЕКЦИИ

¹Д. П. Зверев, ¹А. Ю. Шитов*, ¹А. Н. Андрусенко, ¹В. И. Чернов, ¹З. М. Исрафилов,
¹И. Р. Кленков, ²Л. Н. Воробьева

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

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

Цель работы: с помощью пероральных нагрузочных почечных проб выявить механизмы изменений функций почек и водно-электролитного обмена у водолазов с разной исходной устойчивостью к неблагоприятным факторам гипербарии.

Материалы и методы. Проведено обследование 44 мужчин. У всех испытуемых оценивалась исходная устойчивость к неблагоприятным факторам гипербарии. Для определения состояния функций почек были проведены пероральные нагрузочные почечные пробы в условиях влияния гипоксии, гипероксии, токсических концентраций азота и декомпрессионного газообразования.

Результаты и их обсуждение. Изменения функций почек и водно-электролитного обмена, происходящие при действии факторов гипербарии во многом определяются гормональными механизмами, реализуемыми посредством ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС). При действии гипоксии, гипероксии, токсических концентраций азота и декомпрессионного газообразования на неустойчивых испытуемых вектор изменений деятельности РААС будет в основном направлен в сторону увеличения секреции антидиуретического гормона и альдостерона.

Ключевые слова: морская медицина, водолаз, гипоксия, токсическое действие азота, токсическое действие кислорода, декомпрессионная болезнь, почечные пробы, водно-электролитный обмен

*Контакт: Шитов Арсений Юрьевич, arseniyshitov@mail.ru

© Zverev D.P., Shitov A.Yu., Andrusenko A.N., Chernov V.I., Israfilov Z.M., Klenkov I.R., Vorobyova L.N., 2022

MECHANISMS OF VIOLATIONS OF WATER-ELECTROLYTE METABOLISM UNDER THE INFLUENCE OF UNFAVORABLE FACTORS OF HYPERBARIA AND PROMISING POSSIBILITIES OF THEIR CORRECTION

¹Dmitry P. Zverev, ¹Arseny Yu. Shitov*, ¹Andrey N. Andrusenko, ¹Vasily I. Chernov,
¹Zagir M. Israfilov, ¹Ilyas R. Klenkov, ²Larisa N. Vorobyova

¹S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

²Pavlov First St. Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia

The purpose of the work: to identify the mechanisms of changes in kidney function and water-electrolyte metabolism in divers with different initial resistance to adverse factors of hyperbaria using oral stress renal tests.

Materials and methods. 44 men were examined. Initial resistance to adverse factors of hyperbaria was assessed in all subjects. To determine the state of kidney function, oral stress renal tests were performed under the influence of hypoxia, hyperoxia, toxic nitrogen concentrations and decompression gas formation.

Results and their discussion. Changes in kidney function and water-electrolyte metabolism occurring under the action of hyperbaria factors are largely determined by hormonal mechanisms implemented through the renin — angiotensin-aldosterone system (RAAS). Under the action of hypoxia, hyperoxia, toxic nitrogen concentrations and decompression gas formation on unstable subjects, the vector of changes in the activity of RAAS will mainly be directed towards increasing the secretion of antidiuretic hormone and aldosterone.

Key words: marine medicine, diver, hypoxia, toxic effect of nitrogen, toxic effect of oxygen, decompression sickness, renal tests, water-electrolyte metabolism

*Contact: Shitov Arseniy Yurievich, arseniyshitov@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зверев Д.П., Шитов А.Ю., Андрусенко А.Н., Чернов В.И., Исрафилов З.М., Кленков И.Р., Воробьева Л.Н. Механизмы нарушений водно-электролитного обмена при действии неблагоприятных факторов гипербарии и перспективные возможности их коррекции // *Морская медицина*. 2022. Т. 8, № 1. С. 74–82, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-1-74-82>.

Conflict of interest: the authors stated that there is no potential conflict of interest.

For citation: Zverev D.P., Shitov A.Yu., Andrusenko A.N., Chernov V.I., Israfilov Z.M., Klenkov I.R., Vorobyov L.N. Mechanisms of violations of water-electrolyte metabolism under the influence of unfavorable factors of hyperbaria and promising possibilities of their correction // *Marine medicine*. 2022. Vol. 8, No. 1. P. 74–82, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-1-74-82>.

Введение. При освоении человеком глубин мирового океана, воздушного и космического пространства наибольший практический интерес представляет влияние на организм комплекса факторов, в котором сочетаются действия измененного давления газовой среды и его перепадов, парциальных давлений газов, а также процессы, происходящие в организме вследствие нарушения газового равновесия со средой. Все эти факторы предъявляют повышенные требования к системам организма и способны изменять их деятельность. Это в первую очередь относится к кровообращению и дыханию, которые находятся под влиянием систем, регулирующих гомеостазис. Среди последних важную роль играет деятельность выделительной системы и состояния водно-электролитного обмена [1, с. 129–130; 2, с. 43–44; 3, с. 136–138].

Водно-электролитный обмен является основным видом обмена и составной частью гомеостазиса, отражающего общее состояние организма и обеспечивающего оптимальные условия течения обмена веществ. Изменения этого вида обмена, наступающие под воздействием пребывания организма в условиях измененной газовой среды представляют интерес с точки зрения оценки выраженности расстройств функций как отдельных органов и их систем, так и организма в целом [4, с. 21–24].

В космической медицине интерес к исследованию водно-электролитного обмена связан, в первую очередь, с действием невесомости, проявляющемся в перераспределении жидких сред организма, развитии дегидратации, сопровождающемся увеличенным выведением почками жидкости и осмотически активных веществ. При пребывании в гипербарической среде многими исследователями отмечены похожие изменения гидратации тканей организма, проявляющиеся развитием отрицатель-

ного водного баланса и дегидратацией различных тканей [5, с. 46–53; 6, с. 6–10; 7, с. 20–21].

Потеря воды и её перераспределение в организме может приводить к гипогидратации и гемоконцентрации, что, по нашему мнению, не только неблагоприятно сказывается на состоянии гомеостазиса, но и может служить предпосылкой к росту специфической заболеваемости водолазов. Выход из строя систем жизнеобеспечения летательных и подводных аппаратов, космических скафандров и водолазного снаряжения изменяет состав дыхательной газовой смеси, что также может оказывать существенное влияние на водно-электролитный обмен и функции почек, а следовательно и на функциональное состояние организма человека [8, с. 108–109].

Перечисленные изменения водно-электролитного обмена могут быть следствием как поражения многих органов и систем организма, так и того, что возникновение гипогидратации, перераспределения жидких сред и электролитов является пусковым механизмом развивающейся адаптации организма к действию факторов водолазного труда. Учитывая последнее, можно предположить, что состояние водно-электролитного обмена и функционирование выделительной системы будет отражать устойчивость организма ко многим неблагоприятным факторам гипербарии. Следовательно, необходимо исследование роли почек и систем их регуляции (в первую очередь гормональных) в условиях действия на организм водолазов неблагоприятных факторов подводного погружения. Это требуется для выбора путей профилактики нарушений водно-электролитного обмена и, что особенно важно, для отбора лиц, быстро адаптирующихся и имеющих высокую устойчивость к этим неблагоприятным факторам.

В водолазной медицине есть единичные исследования, посвященные проблеме исследования механизмов регуляции и, что особенно важно, коррекции водно-электролитного обмена и связанной с ним деятельности почек при нахождении в условиях измененного давления газовой и водной среды.

При этом выделительная система является одной из систем, ответственных за выведение растворенных в организме газов. В имеющейся литературе недостаточно данных, отражающих участие выделительной системы в схемах патогенеза водолазных заболеваний. Во многом это связано с методическими трудностями, невозможностью исследователей находиться рядом с испытуемыми и проведением большого числа модельных экспериментов (в том числе на животных).

Проведенные ранее исследования показали, что для оценки функций выделительной системы и связанного с ними водно-электролитного обмена возможно проведение простых нагрузочных, функциональных проб, оценивающих, в том числе и резервные возможности выделительной системы. Арсенал данных проб в настоящее время достаточно широк, в то же время они не нашли широкого применения в водолазной медицине, хотя в клинической, а также авиационной и космической медицине существует большое количество подобных исследований [6, с. 6–12].

Именно поэтому в настоящее время в водолазной медицине актуальна задача разработки способов исследования и воздействия на водно-электролитный обмен, основанных на выявлении патогенетических, гормональных механизмов расстройств, привлечении медикаментозных средств и безмедикаментозном воздействии на ткани организма с целью снижения вероятности неблагоприятных изменений, возникающих при влиянии на человека факторов подводных погружений. В более ранних работах нами было показано, что общая регуляция водно-электролитного обмена в условиях гипербарии осуществляется нейрогуморальными механизмами [9, с. 53–54].

Иницилирующими сигналами дисбаланса в обмене электролитов и воды являются изменения объема и (или) осмолярности внеклеточной жидкости, приводящие к раздражению осморцепторов. Гуморальными эффекторами реакции центральной нервной системы на сигнал с осморцепторов и (или) соответствующих

барорецепторов в большинстве случаев являются вазопрессин (антидиуретический гормон) и альдостерон. Все это явилось основанием для проведения исследований влияния неблагоприятных факторов водолазного спуска на регуляцию и состояние водно-электролитного обмена человека.

Цель исследования: определить патогенетические механизмы изменений, возникающих в водно-электролитном обмене и функциях почек водолазов при действии гипоксии, гипероксии, токсических концентраций азота и декомпрессионном газообразовании.

Материалы и методы. Обследовано 44 мужчины в возрасте 19–23 лет, признанных годными к водолажным спускам по состоянию здоровья. Всего проведено пять серий исследований. В первой серии исследований у всех испытуемых определяли исходную устойчивость к декомпрессионному газообразованию, гипоксической гипоксии, токсическому действию кислорода по стандартным методикам, принятым в водолазной медицине [10, с. 208–212].

Изменения водно-электролитного обмена, функций почек у испытуемых определяли путем оценки данных, полученных в четырех последующих сериях исследований с помощью разработанных нами пероральных нагрузочных почечных проб [11, с. 63–64].

При оценке влияния на функции почек декомпрессионного газообразования, токсического действия азота и кислорода пероральные нагрузочные почечные пробы проводили во время нахождения в барокамере, а при действии гипоксической гипоксии — сразу после окончания дыхания 10% кислородно-азотной смесью.

Целью второй серии было определение индекса функциональной активности почек (ИФАП), индекса волюморегулирующей активности почек (ИВАП), индекса калийуретической активности почек (ИКАП), индекса кальцийуретической функции почек (ИКФП) после соответствующих пероральных водно-солевых нагрузок в условиях возникновения декомпрессионного газообразования различной интенсивности. В третьей серии исследований определяли вышеуказанные показатели в условиях гипоксической гипоксии, в четвертой серии — при действии гипероксии, а в пятой серии — при действии на организм токсических концентраций азота при дыхании воздухом под давлением 0,8 МПа.

При анализе полученных данных решались такие задачи, как описание исследуемых параметров в группах и оценка значимости различия количественных показателей. В ходе исследования применяли корреляционный анализ. Для статистического анализа использовались пакеты прикладных программ Statistica for Windows 10.0. Достоверность различий средних значений независимых выборок при нормальном распределении оценивали по параметрическому критерию Стьюдента. Нормальный тип распределения выборок подтверждался с помощью теста Шапиро–Уилка. В остальных случаях применяли непараметрический критерий Манна–Уитни. Критический уровень значимости при проведении исследований был равен 0,05.

Результаты и их обсуждение. В результате проведенных исследований было выявлено, что устойчивость к декомпрессионному газообразованию имеет сильную прямую корреляционную взаимосвязь с ИВАП и связи средней силы с ИКАП, ИФАП и ИКФП [14, с. 87–90]. Устойчивость к токсическому действию кислорода имеет сильную прямую корреляционную взаимосвязь с ИФАП и связи средней силы с ИВАП и ИКФП [17, с. 70–72]. Устойчивость к токсическому действию азота имеет прямые взаимосвязи средней силы с ИФАП и ИВАП и слабые прямые взаимосвязи с ИКАП и ИКФП [9, с. 54–61]. Устойчивость к гипоксической гипоксии имеет сильную прямую связь с ИКАП, связь средней силы с ИКФП и слабые связи с ИФАП и ИВАП [11, с. 64–65].

Наличие сильной взаимосвязи устойчивости к декомпрессионному газообразованию и токсическому действию азота с ИВАП может быть обусловлено тем, что нагрузка NaCl в данном случае указывает на снижение почечного функционального резерва за счет уменьшения клубочковой фильтрации у испытуемых, неустойчивых к этим факторам гипербарии. Известно, что при гиперосмотических нагрузках происходит увеличение скорости клубочковой фильтрации, повышение количества и осмолярности выделяемой мочи. В последние годы значительную роль в этих механизмах отводят оксиду азота, который способствует вазодилатации афферентной артериолы клубочка [12, с. 45–46].

Однако у испытуемых, неустойчивых к декомпрессионному газообразованию и токсическому действию азота наблюдается обратная

реакция, заключающаяся в снижении количества выделяемой мочи и ее осмолярности, проявляющаяся снижением ИВАП. Это может быть обусловлено нарушением (или торможением) продукции эндогенного оксида азота, который на уровне почечной микроциркуляции обеспечивает повышение гломерулярного кровотока [13, с. 74–75; 14, с. 86–89].

Сильная прямая взаимосвязь ИФАП с устойчивостью к токсическому действию кислорода указывает на общность физиологических механизмов, лежащих в основе полиурической реакции почек здорового организма, возникающей при гипероксии или пероральном введении повышенного количества воды. В настоящее время постулируется тезис о «диурезе давления» как одном из наиболее филогенетически древних механизмов адаптации организма к гипероксии, направленном на избавление его от избытка кислорода [15, с. 128–140]. Известно, что гипероксия увеличивает проницаемость гистогематического барьера, а следовательно, она будет усиливать диффузию осмотически активных веществ и воды через капиллярную стенку в интерстиций. Это, в свою очередь, вызовет раздражение периферических осморорецепторов, импульсы от которых достигнут нейронов заднего гипоталамуса, вызывая их возбуждение [16, с. 1432–1434; 17, с. 69–72].

Таким образом, у лиц, неустойчивых к токсическому действию кислорода, снижение ИФАП будет указывать на несовершенство механизмов осморорецепции (извращение работы α -адренорецепторов сосудов) или, что более вероятно, на возникновение под действием больших доз кислорода патологических очагов возбуждения в нейронах заднего гипоталамуса. Эти очаги будут стимулировать секрецию ренина, который, в свою очередь, повысит секрецию альдостерона. Под действием альдостерона будет происходить задержка в организме хлоридов, воды и натрия, а также усиленное выделение с мочой калия и аммония. В результате будет увеличиваться объем циркулирующей крови и формироваться алкалоз. Вероятно, именно этим механизмом объясняется быстрый рост минутного объема кровообращения у испытуемых, неустойчивых к токсическому действию кислорода.

Проведение нагрузочных пероральных почечных проб с калия хлоридом и лактатом кальция показало, что у лиц, неустойчивых к гипоксической гипоксии, происходит замедление выведения калия и кальция с мочой.

Известно, что способность клеток удерживать калий напрямую связана с тренированностью мышц, ведь они являются его основным депо [15, с. 134–145]. При недостаточной тренированности мышц снижается способность мышечных клеток удерживать калий. Поэтому у нетренированных испытуемых, имевших в исходном состоянии недостаток калия в депо, нагрузка данным катионом приводит к постепенному поступлению катиона в мышечные клетки и, соответственно, к замедлению его выведения с мочой. Почечная экскреция калия может быть представлена как результат трех процессов: клубочковой фильтрации, канальцевой реабсорбции и канальцевой секреции. Нарушение или несостоятельность одного из этих процессов, по всей видимости, имеют место у лиц с низкой устойчивостью к гипоксической гипоксии. Подтверждают это и данные исследований, указывающие на снижение скорости выведения калия при нагрузке калия хлоридом у детей (до 10–11-летнего возраста) и животных раннего возраста с недостаточной сформированностью физиологических механизмов гомеостатической регуляции экскреции калия [18, с. 319–321; 19, с. 50–51].

Возможно, причинами пониженного выведения калия при нагрузочной пробе у лиц, имеющих низкую и среднюю устойчивость к гипоксической гипоксии, является как снижение гломерулярной фильтрации, так и скрытая неполноценность гормональных механизмов регуляции обмена этого катиона (скрытый гипотальдостеронизм или гипокортицизм). Так, при гипотальдостеронизме происходит нарушение экскреции калия почками из-за нарушения обмена натрия на калий в дистальных отделах почечных канальцев. Кроме того, пониженное выведение калия из организма водозависимых, неустойчивых к гипоксической гипоксии, при нагрузочных пробах может говорить о выработке у таких испытуемых антагонистов альдостерона или сниженном запасе натрия в организме. Наличие сильной прямой взаимосвязи между ИКАП и устойчивостью к гипоксической гипоксии косвенно подтверждает связь между общей физической тренированностью человека и устойчивостью к этому неблагоприятному фактору гипербарии [20, с. 16–18].

Замедление экскреции кальция при пероральной нагрузке лактатом кальция у лиц, неустойчивых к гипоксической гипоксии, указывает либо на нарушение его транспорта в ка-

нальцах нефронов, либо на особенности всасывания кальция в кишечнике и существование гепато-энтерального круговорота при его поступлении в желудочно-кишечный тракт. В то же время можно предположить, что снижение тубулярной реабсорбции и усиление выведения кальция после нагрузки у лиц, устойчивых к гипоксической гипоксии, связано с повышением секреции тирокальцитонина. В свою очередь, увеличение выработки тирокальцитонина с высокой вероятностью обусловлено стимуляцией гастрина в пищеварительном тракте или повышением уровня ионизированного кальция в крови у испытуемых, имевших высокую устойчивость к гипоксической гипоксии.

В результате проведенных исследований показано, что пребывание человека в условиях гипербарии может способствовать формированию иного гидратационного статуса организма, что, вероятно, помогает адаптироваться к необычным условиям жизнедеятельности. Основой этих реакций является уменьшение объема внеклеточной и внутрисосудистой жидкости. Однако измененная гидратация, обеспечивающая приспособление к действию повышенного давления газовой среды, может снижать устойчивость организма к неблагоприятным факторам гипербарии и приводить к неблагоприятным изменениям в деятельности сердечно-сосудистой системы в нормобарических условиях. Если изменения водно-электролитного баланса являются адаптационными, то по их выраженности можно судить об адаптированности каждого конкретного человека к гипербарии. В этом случае использование средств и методов, вызывающих незначительную гипогидратацию на протяжении некоторого периода перед спуском, будет полезно с точки зрения ускорения естественного адаптационного процесса к факторам водолазного труда.

В основе изменений водно-электролитного баланса организма при погружениях под воду может лежать влияние дыхательной газовой смеси на дыхательную систему и перемещение крови в краниальном направлении. Следствием этого является увеличение центрального и сосудистого объемов крови. Увеличение центрального объема крови приводит к включению срочных приспособительных механизмов (нейронных, гуморальных и прямых гидравлических). Эти механизмы способствуют удалению из организма «мнимого» избытка жидкости, что реализуется в снижении концентрации

АДГ и альдостерона и проявляется в увеличении выделения мочи и ряда ионов почками.

При возвращении к земным условиям обитания (нормобарии), часть крови вновь оттекает к нижней половине тела, следствием чего может стать несоответствие ёмкости сосудистого русла ОЦК. Если данное предположение справедливо, то оно может стать основой разработки целой группы методик, заключающихся в восполнении сосудистого русла на завершающем этапе погружения и после спусков под воду, а также методик, позволяющих за счет воздействия на сосуды нижней половины тела добиться соответствия их объема тому количеству крови, который в них поступает. Кроме того, при использовании методик «тренирующих» — воздействующих на сосуды нижних конечностей (например, с помощью создания отрицательного давления над нижней частью тела), можно добиться быстрой адаптации человека к воздействию повышенного давления газовой смеси на дыхательную систему.

Дальнейшее исследование применения таких проб в водолазной медицине может служить основой использования их результатов в качестве критерия физиологического отбора водолазов. Кроме того, использование различных нагрузочных почечных проб может стать основой разработки различных солевых добавок, применение которых в будущем трансформируется в один из методов патогенетической коррекции уровня гидратации организма и профилактики неблагоприятных изменений водно-электролитного обмена у водолазов. Как следствие использование таких солевых доба-

вок открывает новые возможности в профилактике водолазных заболеваний.

Заключение. Проведенные исследования показали, что из всех факторов, обуславливающих специфичность водолазного труда, наибольшее значение имеют факторы повышенного давления, определяемые свойствами газовой и водной сред [9, с. 54–61; 11, с. 64–65; 14, с. 87–90; 17, с. 70–72]. Такими факторами являются величина и перепады общего и гидростатического давления, а также парциальные давления газов, входящих в состав дыхательных смесей.

Изменения функций почек и водно-электролитного обмена, происходящие при действии факторов гипербарии, во многом определяются гормональными механизмами, реализуемыми посредством ренин-ангиотензин-альдостероновой системы (РААС) [9, с. 52–54]. При действии различных факторов гипербарии на неустойчивых испытуемых вектор изменений деятельности РААС будет в основном направлен в сторону увеличения секреции антидиуретического гормона и альдостерона.

Таким образом, нарушения водно-электролитного обмена при действии многочисленных факторов водолазного погружения затрагивают общие патогенетические механизмы, реализованные посредством влияния на РААС. Поэтому исследование работы РААС в таких условиях актуально с точки зрения выработки общих рекомендаций по профилактике и лечению большинства водолазных заболеваний, а также оптимальной организации медицинского обеспечения водолазных спусков.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Быков В.Н., Ветряков О.В., Цыган В.Н., Халимов Ю.Ш., Анохин А.Г., Фатеев И.В., Калтыгин М.В., Толстой О.А. Оценка устойчивости военнослужащих к гипоксии на фоне гипобарии и высокой физической активности // *Вестник Российской Военно-медицинской академии*. 2017. № 3 (59). С. 129–133. Bykov V.N., Vetryakov O.V., Cygan V.N., Halimov Yu.Sh., Anohin A.G., Fateev I.V., Kaltygin M.V., Tolstoj O.A. Ocenka ustojchivosti voennosluzhashchih k gipoksii na fone gipobarii i vysokoj fizicheskoj aktivnosti // *Vestnik Rossijskoj Voенно-medicinskoj akademii*. 2017. № 3 (59). S. 129–133 [Bykov V.N., Vetryakov O.V., Tsygan V.N., Khalimov Yu.Sh., Anokhin A.G., Fateev I.V., Kaltygin M.V., Tolstoy O.A. Assessment of military personnel tolerance to hypoxia on the background of hypobaria and high physical activity. *Bulletin of the Russian Military medical academy*, 2017, No. 3 (59), pp. 129–133 (In Russ.)].
2. Благинин А.А., Жильцова И.И., Емельянов Ю.А. Вопросы декомпрессионной безопасности летного состава // *Военно-медицинский журнал*. 2017. Т. 338, № 7э С. 42–45. Blaginin A.A., Zhil'cova I.I., Emel'yanov Yu.A. Voprosy dekompressionnoj bezopasnosti lyotnogo sostava // *Voенно-medicinskij zhurnal*. 2017. Т. 338, No. 7. S. 42–45. [Blaginin A.A., Zhiltsova I.I., Emelyanov Yu.A. Flight crew decompression safety issues. *Military Medical Journal*, 2017, Vol. 338, No 7, pp. 42–45 (In Russ.)].
3. Газенко О.Г., Григорьев А.И., Егоров А.Д. Физиологические эффекты действия невесомости на человека в условиях космического полета // *Физиология человека*. 1997. Т. 23, № 2. С. 138–146. Gazenko O.G., Grigor'ev A.I., Egorov A.D.

- Fiziologicheskie efekty dejstviya nevesomosti na cheloveka v usloviyah kosmicheskogo polyota // *Fiziologiya cheloveka*. 1997. T. 23, № 2. S. 138–146. [Gazenko O.G., Grigoriev A.I., Egorov A.D. Physiological effects of weightlessness on humans in space flight. *Human Physiology*, 1997, Vol. 23, No 2, pp. 138–146 (In Russ.)].
4. Карпищенко А.И., Антонов В.Г. *Лабораторно-диагностическая оценка водно-электролитного обмена*. СПб.: ВМедА, 1996. 58 с. Karpishchenko A.I., Antonov V.G. *Laboratorno-diagnosticheskaya ocenka vodno-elektrolitnogo obmena*. SPb.: VMedA, 1996. 58 s. [Karpishchenko A.I., Antonov V.G. Laboratory-diagnostic assessment of water-electrolyte metabolism. St. Petersburg: *Military Medical Academy*, 1996, 58 p. (In Russ.)].
 5. Довгуша В.В., Следков А.Ю. Индифферентные газы, рецепция и наркоз. СПб.: Пресс-Сервис, 2006. 102 с. Dovgusha V.V., Sledkov A.Yu. *Indifferentnye gazy, recepciya i narkoz*. SPb.: Press-Servis, 2006. 102 s. [Dovgusha V.V., Sledkov A.Yu. *Indifferent gases, reception and anesthesia*. St. Petersburg: Publishing house Press-Service, 2006. 102 p. (In Russ.)].
 6. Григорьев А.И., Ларина И.М., Носков В.Б. Влияние космических полетов на состояние и регуляцию водно-электролитного обмена // *Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова*. 2006. Т. 92, № 1. С. 5–17. Grigor'ev A.I., Larina I.M., Noskov V.B. Vliyanie kosmicheskikh polyotov na sostoyanie i regulyaciyu vodno-elektrolitnogo obmena // *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I. M. Sechenova*. 2006. T. 92, № 1. S. 5–17. [Grigoriev A.I., Larina I.M., Noskov V.B. The influence of space flights on water-electrolytes turnover and its regulation. *Russian Physiological Journal*, 2006, Vol. 92, No 1, pp. 5–17 (In Russ.)].
 7. 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. Korrekciya urovnya gidratacii organizma na razlichnyh etapah kosmicheskogo poleta // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina*. 2003. T. 37, № 2. S. 19–22. [Noskov V.B. Correction of the level of hydration of the body at different stages of space flight. *Aviation and Space and Environmental Medicine*, 2003, Vol. 37, No. 2, pp. 19–22 (In Russ.)].
 8. Носков В.Б., Лобачик В.И., Чепуштанов С.А. Объем внеклеточной жидкости при действии факторов длительного космического полета // *Физиология человека*. 2000. Т. 26, № 5. С. 106–110. Noskov V.B., Lobachik V.I., Chepushtanov S.A. Ob»yom vnekletochnoj zhidkosti pri dejstvii faktorov dlitel'nogo kosmicheskogo polyota // *Fiziologiya cheloveka*. 2000. T. 26, № 5. S. 106–110. [Noskov V.B., Lobachik V.I., Chepushtanov S.A. The volume of extracellular fluid under the action of factors of prolonged space flight. *Human Physiology*. 2000, Vol. 26, No. 5, pp. 106–110 (In Russ.)].
 9. 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. Gormonal'nye mekhanizmy regulyacii vodno-elektrolitnogo obmena u vodolazov // *Izvestiya Rossijskoj Voenno-medicinskoj akademii*. 2021. T. 40, № S2. S. 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. *Proceedings of the Russian Academy of Military Medicine*, 2021, Vol. 40, No. S2, pp. 51–61 (In Russ.)].
 10. Семенов 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. Semencov V.N., Ivanov I.V. Funkcional'nye testy dlya professional'nogo otbora vodolazov i kessonshchikov // *Izvestiya Rossijskoj Voenno-medicinskoj akademii*. 2019. T. 38, № 3. S. 207–216. [Sementsov V.N., Ivanov I.V. Functional tests for professional screening of divers and caissons. *Proceedings of the Russian Academy of Military Medicine*, 2019, Vol. 38, No 3, pp. 207–216 (In Russ.)].
 11. Зверев Д.П., Мясников А.А., Шитов А. Ю., Чернов В.И., Андрусенко А.Н., Кленков И.Р., Исрафилов З.М. Исследование водно-электролитного обмена и функций почек у водолазов в гипербарических условиях с помощью пероральных нагрузочных проб // *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2021. Т. 40, № S2. С. 62–67. Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A. Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Issledovanie vodno-elektrolitnogo obmena i funkcij pochek u vodolazov v giperbaricheskikh usloviyah s pomoshch'yu peroral'nyh nagruzochnykh prob // *Izvestiya Rossijskoj Voenno-medicinskoj akademii*. 2021. T. 40, № S2. S. 62–67. [Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A. Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Research of water-electrolytic exchange and kidney functions of divers under hyperbaric conditions using peroral load samples. *Proceedings of the Russian Academy of Military Medicine*, 2021, Vol. 40, No. S2, pp. 62–67 (In Russ.)].
 12. Гоженко А.И., Доломатов С.И., Шумилова П.А., Топор Е.А., Пятенко В.А., Бад'ин И.Ю. Влияние осмотических нагрузок на функциональное состояние почек здоровых людей // *Нефрология*. 2004, Т. 8, № 2, С. 44–48. Gozhenko A.I., Dolomatov S.I., Shumilova P.A., Topor E.A., Pyatenko V.A., Badiin I.Yu. Vliyanie osmoticheskikh nagruzok na funkcion'al'noe sostoyanie pochek zdorovykh lyudej // *Nefrologiya*. 2004, T. 8, № 2, S. 44–48. [Gozhenko A.I., Dolomatov S.I., Shumilova P.A., Topor E.A., Pyatenko V.A., Badiin I.Yu. Effects of osmotic loads on the functional state of the kidneys in healthy volunteers. *Nephrology*, 2004, Vol. 8, No 2, pp. 44–48 (In Russ.)].

13. Гоженко А.И., Слученко А.Н. Функциональное состояние почек в условиях водной и солевой нагрузок при беременности у крыс на фоне сулемовой нефропатии // *Нефрология*. 2006. Т. 10, № 1. С. 72–76. Gozhenko A.I., Sluchenko A.N. Funkcional'noe sostoyanie pochetk v usloviyah vodnoj i solevoy nagruzok pri beremennosti u kryss na fone sulemovoy nefropatii // *Nefrologiya*. 2006. T. 10, № 1. S. 72–76. [Gozhenko A.I., Sluchenko A.N. The functional state of the kidneys under conditions of water and salt loads during pregnancy in rats against the background of sublimate nephropathy. *Nephrology*, 2006, Vol. 10, No. 1, pp. 72–76 (In Russ.)].
14. Зверев Д.П., Мясников А.А., Шитов А.Ю., Чернов В.И., Андрусенко А.Н., Кленков И.Р., Исрафилов З.М. Функционирование выделительной системы у водолазов в условиях декомпрессионного газообразования // *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2021. Т. 40, № S2. С. 85–92. Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Funkcionirovanie vydelitel'noj sistemy u vodolazov v usloviyah dekompressionnogo gazoobrazovaniya // *Izvestiya Rossijskoj VoЕННО-medicinskoj akademii*. 2021. T. 40, № S2. S. 85–92. [Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A. Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Functioning of the extraction system of divers under the conditions of decompression gas formation. *Proceedings of the Russian Academy of Military Medicine*, 2021, Vol. 40, No. S2, pp. 85–92 (In Russ.)].
15. Молчанов Д.В. *Почки при гипероксии*. М.: БИНОМ, 2015. 160 с. Molchanov D.V. *Pochki pri giperoksii*. M.: BINOM, 2015. 160 s. [Molchanov D.V. *Kidneys with hyperoxia*. Moscow: Publishing house BINOM, 2015. 160 p. (In Russ.)].
16. Финкинштейн Я.Д., Айзман Р.И., Тернер А.Я., Пантюхин И.В. Рефлекторный механизм регуляции калиевого гомеостаза // *Физиологический журнал СССР*. 1973. Т. 59, № 9. С. 1429–1436. Finkinshtejn Ya.D., Ajzman R.I., Terner A.Ya., Pantyuhin I.V. Reflektornyj mekhanizm regulyacii kalievogo gomeostaza // *Fiziologicheskij zhurnal SSSR*. 1973. T. 59, № 9. S. 1429–1436. [Finkinshtejn Ya.D., Aizman R.I., Terner A.Ya., Pantyukhin I.V. The reflex mechanism of the potassium homeostasis regulation. *Physiological journal of the USSR*, 1973, Vol. 59, No 9, pp. 1429–1436 (In Russ.)].
17. Зверев Д.П., Мясников А.А., Шитов А. Ю., Чернов В.И., Андрусенко А.Н., Кленков И.Р., Исрафилов З.М. Исследование функций выделительной системы у водолазов в условиях токсического действия кислорода // *Известия Российской Военно-медицинской академии*. 2021. Т. 40, № S2. С. 68–73. Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Issledovanie funkcij vydelitel'noj sistemy u vodolazov v usloviyah toksicheskogo dejstviya kisloroda // *Izvestiya Rossijskoj VoЕННО-medicinskoj akademii*. 2021. T. 40, № S2. S. 68–73. [Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A. Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N., Klenkov I.R., Israfilov Z.M. Research of the functions of the extractive system of divers under the conditions of toxic action of oxygen. *Proceedings of the Russian Academy of Military Medicine*, 2021, Vol. 40, No. S2, pp. 68–73 (In Russ.)].
18. Айзман Р.И. Регуляция гомеостаза калия: возрастные особенности // *Нефрология и диализ*. 2001. Т. 3, № 3. С. 318–325. Ajzman R.I. Regulyaciya gomeostaza kaliya: vozrastnye osobennosti // *Nefrologiya i dializ*. 2001, T. 3, № 3. S. 318–325. [Ajzman R.I. Regulation of potassium homeostasis: age characteristics. *Nephrology and dialysis*, 2001, Vol. 3, No. 3, pp. 318–325 (In Russ.)].
19. Зарубина И.В. Молекулярные механизмы индивидуальной устойчивости к гипоксии // *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*. 2005. Т. 4, № 1. С. 49–51. Zarubina I.V. Molekulyarnye mekhanizmy individual'noj ustojchivosti k gipoksii // *Obzory po klinicheskoj farmakologii i lekarstvennoj terapii*. 2005. T. 4, № 1. S. 49–51. [Zarubina I.V. Molecular mechanisms of individual resistance to hypoxia. *Reviews on clinical pharmacology and drug therapy*, 2005, Vol. 4, No 1, pp. 49–51 (In Russ.)].
20. Григорьев А.И., Носков В.В. Функциональная проба с хлористым калием после длительных космических полетов // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1997. № 5. С. 15–19. Grigor'ev A.I., Noskov V.B. Funkcional'naya proba s hloristym kaliem posle dlitel'nyh kosmicheskikh poletov // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya medicina*. 1997. № 5. S. 15–19. [Grigoriev A.I., Noskov V.B. Functional test with potassium chloride after prolonged space flights. *Aviation and environmental medicine*, 1997, No. 5, pp. 15–19 (In Russ.)].

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 25.12.2021 г.

Вклад авторов в подготовку статьи:

Вклад в концепцию и план исследования — А. Ю. Шитов, Д. П. Зверев, Л. Н. Воробьева, А. Н. Андрусенко, В. И. Чернов, З. М. Исрафилов, И. Р. Кленков. Вклад в сбор данных — Д. П. Зверев, А. Ю. Шитов, А. Н. Андрусенко, Л. Н. Воробьева, В. И. Чернов, З. М. Исрафилов, И. Р. Кленков. Вклад в анализ данных и выводы — А. Ю. Шитов, А. Н. Андрусенко, Д. П. Зверев, Л. Н. Воробьева, В. И. Чернов, З. М. Исрафилов, И. Р. Кленков. Вклад в подготовку рукописи — А. Ю. Шитов, Д. П. Зверев, Л. Н. Воробьева, А. Н. Андрусенко, В. И. Чернов, З. М. Исрафилов, И. Р. Кленков.

Сведения об авторах:

Зверев Дмитрий Павлович — кандидат медицинских наук, доцент, начальник кафедры (физиологии подводного плавания) федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-ме-

дицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: z.d.p@mail.ru; ORCID 0000-0003-3333-6769; SPIN 7570-9568;

Шитов Арсений Юрьевич — кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры (физиологии подводного плавания) федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: arseniyshitov@mail.ru; ORCID 0000-0002-5716-0932; SPIN 7390-1240; WoS O-3730-2017;

Андрусенко Андрей Николаевич — кандидат медицинских наук, старший преподаватель кафедры (физиологии подводного плавания) федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: an.a.an@mail.ru; ORCID 0000-0001-7393-6000; SPIN 6772-4452;

Чернов Василий Иванович — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры (физиологии подводного плавания) федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: chernov_61@mail.ru; ORCID 0000-0002-8494-1929; SPIN 4767-4001;

Исрафилов Загир Маллараджабович — адъюнкт федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: warag05@mail.ru; ORCID 0000-0002-3524-7412; SPIN 1619-6621;

Кленков Ильяс Рифатьевич — преподаватель кафедры (физиологии подводного плавания) федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: fu-gazik@mail.ru; ORCID 0000-0002-1465-1539; SPIN 9827-8535;

Воробьева Лариса Николаевна — кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры стоматологии детского возраста и ортодонтии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации; 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8; e-mail: vorobuevaln@mail.ru.