

УДК 616-001.11

<http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2020-6-4-44-53>

© Зверев Д.П., Кленков И.Р., Мясников А.А., Шитов А.Ю., Фисун А.В., Старков А.В., Логунов К.В., 2020 г.

УСТОЙЧИВОСТЬ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА К ДЕЙСТВИЮ ВЫСОКИХ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ АЗОТА И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЕЁ ОЦЕНКИ

¹Д. П. Зверев, ¹И. Р. Кленков*, ¹А. А. Мясников, ¹А. Ю. Шитов, ¹А. В. Фисун, ²А. В. Старков, ³К. В. Логунов

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

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

³Санкт-Петербургский государственный университет; Общество с ограниченной ответственностью «Медикон», Санкт-Петербург, Россия

Целью данной работы явилась разработка алгоритма оценки устойчивости организма человека к действию высоких парциальных давлений азота.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 125 водолазов. Испытуемых размещали в водолазной барокамере, где повышали давление воздухом до 0,8 МПа (70 м вод. ст.). До повышения давления и под максимальным давлением у испытуемых определяли функции: внимания — с помощью методик корректурной пробы с кольцами Ландольта, словесно-цветовой интерференции (тест Струпа) и «Расстановка чисел»; мышления — с помощью методик сложения и вычитания с переключением с использованием таблицы Крепелина, арифметических тестов «сложение в уме», «умножение в уме» и «вычитание в уме»; тонкомышечной деятельности — с помощью методик «тест Беннета», тест «квадраты» и макрографии.

Результаты и их обсуждение. В результате сравнительного и дискриминантного анализов из десяти методик и двадцати двух показателей, используемых в практике медицинского обеспечения водолазных спусков, выбраны две, позволяющие с высокой долей достоверности выявить степень изменения функционирования центральной нервной системы при действии высоких парциальных давлений азота. На основе изменений скорости переработки информации в зрительном анализаторе и процессов мышления определяется устойчивость организма человека к действию высоких парциальных давлений азота.

Ключевые слова: морская медицина, устойчивость, азотный наркоз, водолаз, алгоритм

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зверев Д.П., Кленков И.Р., Мясников А.А., Шитов А.Ю., Фисун А.В., Старков А.В., Логунов К.В. Устойчивость организма человека к действию высоких парциальных давлений азота и методические аспекты её оценки // *Морская медицина*. 2020. Т. 6, № 4. С. 44–53, <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2020-6-4-44-53>.

*Контакт: *Кленков Ильяс Руфатович, fugazik@mail.ru*

© Zverev D.P., Klenkov I.R., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Fisun A.V., Starkov A.V., Logunov K.V., 2020

RESISTANCE OF THE HUMAN BODY TO THE ACTION OF HIGH PARTIAL PRESSURE OF NITROGEN AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF ITS ASSESSMENT

¹Dmitriy P. Zverev, ¹Ilyas R. Klenkov*, ¹Aleksey A Myasnikov, ¹Arseniy Yu. Shitov,

¹Anton V. Fisun, ²Aleksandr V. Starkov, ³Konstantin V. Logunov

¹Military Medical Academy named after S. M. Kirov, Saint Petersburg, Russia

²First Saint Petersburg State Medical University named after I. P. Pavlov, Saint Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University; Limited Liability Company «Medicon», Saint Petersburg, Russia

The purpose of the study was the development of an algorithm for assessing the resistance of the human body to the action of high partial pressures of nitrogen.

Materials and methods: 125 divers were enrolled in the study. The subjects were placed in a diving pressure chamber, where the air pressure was increased to 0,8 MPa (70 m water column). Before the pressure increase and under maximum pressure, the following functions were assessed in the subjects: attention — using the Landolt's rings visual acuity test, verbal-color interference (Stroop test) and «Numbering»; thinking — using the methods of addition and subtraction with switching using the Kraepelin table, arithmetic tests «addition in the mind», «multiplication in the mind» and «subtraction in the mind»; small muscle activity — using the Bennett test, the squares test and macrography.

Results and discussion. As a result of comparative and discriminant analyzes, out of ten methods and twenty-two indicators used in the practice of medical support for dives, two were selected, allowing with a high degree of reliability to identify the degree of change in the functioning of the central nervous system under the action of high partial pressures of nitrogen. On the basis of changes in the data processing rate in the visual analyzer and thinking processes, the resistance of the human body to the action of high partial pressures of nitrogen is determined.

Key words: marine medicine, resistance, raptures of the deep, diver, algorithm

Conflict of interest: authors declared no conflict of interest.

For citation: Zverev D.P., Klenkov I.R., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Fisun A.V., Starkov A.V., Logunov K.V.

Resistance of the human body to the action of high partial pressures of nitrogen and methodological aspects of its assessment // *Marine medicine*. 2020. Vol. 6, No. 4. P. 44–53, <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2020-6-4-44-53>.

*Contact: *Klenkov Ilyas Rifatievich, fugazik@mail.ru*

Введение. Работа под водой всегда связана с воздействием на организм человека большого количества разномодальных факторов, обусловленных физико-химическими свойствами окружающей среды, прежде всего повышенным давлением газовой и водной среды, тактико-техническими характеристиками водолазного снаряжения, составом дыхательных газовых смесей. В условиях водной среды и после выхода из нее профессиональная работоспособность водолазов существенно снижается, в том числе и из-за механического и биологического действия повышенного давления окружающей среды¹. Вследствие этих воздействий со стороны органов и систем организма происходят неодинаковые по степени выраженности изменения в их функционировании, что может неблагоприятно сказываться на функциональном состоянии организма человека, его работоспособности, а в отдельных случаях — обуславливает развитие специфических патологических состояний [1, с. 745].

Одной из главных задач медицинского отбора водолазов, наряду с выявлением болезней, препятствующих работе по специальности «водолаз», является определение устойчивости организма к действию неблагоприятных факторов повышенного давления газовой и водной сред,

а именно: перепады общего давления, высокие и низкие парциальные давления индифферентных и биологически активных газов и т.д. В настоящее время регламентировано проведение 5 специальных проб для проверки устойчивости кандидатов на обучение по специальности «водолаз»: устойчивость к декомпрессионному газообразованию, устойчивость к токсическому действию высоких парциальных давлений кислорода, устойчивость к токсическому действию высоких парциальных давлений азота, устойчивость к кислородному голоданию и барофункция [2, с. 5–19]. Все пробы являются «прямыми», т.е. включают в себя дозированное действие проверяемого фактора, а результатом служит ответная реакция организма человека. Следовательно, для проверки устойчивости к факторам повышенного давления необходима барокамера. Учитывая, что водолазные врачи по роду своей деятельности должны оказывать помощь пострадавшим в условиях повышенного давления, например, при проведении лечебной рекомпрессии, важно, чтобы во время обучения, как и при подготовке водолазов, они могли бы испытать действие повышенного давления на себе. К сожалению, учебные заведения, осуществляющие подготовку водолазных врачей как для силовых ведомств, так и для гражданского здравоохранения,

¹ Сохранение и повышение военно-профессиональной работоспособности специалистов флота в процессе учебно-боевой деятельности и в экстремальных ситуациях: методические рекомендации / под ред. Ю.М.Боброва, В.И.Кулешова, А.А.Мясникова. СПб.: ВМедА, 2015. 182 с. [Preservation and improvement of military professional efficiency of fleet specialists in the process of training and combat activities and in extreme situations: guidelines / ed. Yu.M.Bobrov, V.I.Kuleshova, A.A.Myasnikov. St. Petersburg: VMedA, 2015, 182 p. (In Russ.)].

нения, не обладают необходимой материально-технической базой, прежде всего, многочисленными медицинскими барокамерами [3, с. 38–42].

Биологическое действие повышенного давления обусловлено увеличением парциального давления метаболически активных газов (кислорода и диоксида углерода), а также индифферентных газов (азота, гелия, водорода, аргона, неона и др.), входящих в состав дыхательных газовых смесей. При дыхании газовой смесью с увеличивающимся парциальным давлением азота (более 320 кПа) возникает сначала незначительное, а по мере роста парциального давления азота, выраженное снижение работоспособности вплоть до полной ее утраты и потеря сознания. Подобные проявления были описаны (Damant G.C., 1930) в конце 20-х годов прошлого столетия [4, р. 606–608], а в 1935 г. экспериментально установлена связь этих неблагоприятных изменений водолазов с величиной парциального давления азота (Behnke A.R., 1935) [5, р. 554–557]. Эти проявления имеют большое сходство с состоянием, возникающим при клиническом наркозе, в связи с чем сформировались термины «наркоз инертным газом» [6, р. 198–199] и «азотный наркоз» [7, с. 145]. В последнее время воздействие высоких парциальных давлений азота принято называть токсическим действием¹.

Основные проявления токсического действия азота выражаются в эмоционально-волевой сфере, когнитивных процессах, в функционировании сенсорных систем и нарушении тонкомышечной координации [8, с. 11–28]. В связи с неодинаковой устойчивостью человека к высокому парциальному давлению азота у разных людей эти изменения проявляются при различных величинах pN_2 .

В общебиологическом смысле под устойчивостью понимают способность организма при-

способливаться к изменившимся условиям и/или действию неблагоприятных факторов. Развитие устойчивости характеризуется комплексом приспособительно-компенсаторных реакций, направленных на поддержание постоянства внутренней среды организма — гомеостаза [9, с. 129–131]. Применительно к действию высоких парциальных давлений азота устойчивость человека характеризуется его индивидуальной ответной реакцией на действие высоких pN_2 в условиях гипербарии.

Методические подходы к исследованию устойчивости организма человека к действию высоких парциальных давлений азота были обоснованы и предложены Г. Л. Зальцманом в середине 70-х годов прошлого столетия [10, с. 186–195]. Дальнейшее совершенствование организационных и методических основ оценки устойчивости организма было продолжено в исследованиях И. П. Юнкина [11, с. 148–161], Ю. М. Боброва [12, с. 13], А. Н. Поликарпочкина [13, с. 56], А. Н. Вётоша [8, с. 95–103], А. Ю. Следкова [14, с. 15–24]. Эти исследования позволили обосновать необходимость отбора водолазов-глубоководников и акванавтов, что нашло отражение в руководящих документах по порядку медицинского освидетельствования водолазного состава силовых ведомств и в гражданском здравоохранении. В них регламентируются методики для оценки устойчивости организма человека к факторам повышенного давления, в том числе к наиболее неблагоприятному для водолазов-глубоководников и акванавтов — к действию высоких парциальных давлений азота (ВПДА)².

Методика определения устойчивости к действию ВПДА включает в себя проведение психофизиологических обследований в многоместной барокамере при нормальном и повышенном давлении воздуха³. У этой методики

¹ Волков Л.К., Сапов И.А., Юнкин И.П. Физиология подводного плавания и аварийно-спасательного дела: учебник для вузов. Л., 1986. Ч. III. Гл. 4: Наркотическое действие индифферентных газов. Нервный синдром высоких давлений. С. 200–211. [Volkov L.K., Sapov I.A., Yunkin I.P. Physiology of scuba diving and emergency rescue: textbook for Universities. Leningrad, 1986. Part III. Ch. 4: Narcotic effect of indifferent gases. Nervous syndrome of high pressures, pp. 200–211 (In Russ.).]

² Приказа Министра обороны Российской Федерации от 20.10.2014 г. № 770 «О мерах по реализации в Вооруженных Силах Российской Федерации правовых актов по вопросам проведения военно-врачебной экспертизы» // Российская газета. 2015. № 24/1, 06 февраля. [Order of the Minister of defense of the Russian Federation of 20.10.2014 No. 770 «On measures for the implementation in the Armed Forces of the Russian Federation of legal acts on military medical expertise». Rossiyskaya Gazeta. 2015. No. 24/1, February 06. (In Russ.).]

³ Инструкция о порядке проведения медицинского освидетельствования водолазного состава Военно-Морского Флота. М., 2003. 10 с. [Instructions on the procedure for conducting a medical examination of the diving staff of the Navy. Moscow, 2003. 10 p. (In Russ.).]

имеются как достоинства (относительная простота и доступность, возможность как объективной, так и субъективной оценки), так и недостатки (трудности при осуществлении массового отбора водолазов, ограничение экспозиции под наибольшим давлением из-за высокого риска возникновения бессимптомного декомпрессионного газообразования, что часто не позволяет провести весь комплекс психофизиологического тестирования).

Методика определения устойчивости к действию ВПДА проводится при повышенном давлении воздуха 0,9 МПа с выдержкой под максимальным давлением до 5 минут, с последующей декомпрессией по стандартному режиму без возможности его удлинения, что может приводить к бессимптомному декомпрессионному газообразованию и развитию хронической декомпрессионной болезнью¹. Для совершенствования методики определения устойчивости организма к действию ВПДА нами ранее [15, с. 21–23] была обоснована возможность уменьшения наибольшего давления для определения устойчивости до 0,8 МПа. Это позволило увеличить время нахождения под наибольшим давлением 0,8 МПа до 15 минут и при необходимости «удлинять» режим декомпрессии, что важно при участии в обследовании лиц со средней и низкой устойчивостью к декомпрессионному газообразованию.

Целью данной работы явилось совершенствование методики для оценки устойчивости организма человека к действию высоких парциальных давлений азота.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 125 водолазов в возрасте от 23 до 42 лет (средний возраст $29,7 \pm 5,1$ года), со стажем водолазных работ от 1 года до 12 лет (средний стаж $5 \pm 3,8$ года) и наработкой от 50 до 1500 спусковых часов, в среднем $120 \pm 27,3$ часа; с интенсивностью гипербарических воздействий (Зверев Д.П., 2011) $7,8 \pm 2,9$ часа в месяц. После инструктажа и медицинского осмотра испытуе-

мые размещались в многоместной барокамере. До повышения давления они выполняли комплекс психофизиологических тестов для оценки: функции внимания с помощью методики корректурной пробы с кольцами Ландольта, словесно-цветовой интерференции (тест Струпа) и «расстановки чисел»; функции мышления с помощью методики сложения и вычитания с переключением с использованием таблицы Крепелина, арифметических тестов («сложение в уме», «умножение в уме» и «вычитание в уме»); тонкомышечной деятельности с помощью методики «тест Беннета», теста «квадраты» и методики макрографии [16, с. 439–441]. Затем в барокамере повышали давление воздухом до 0,8 МПа, при достижении которого испытуемые повторяли ранее выполненный комплекс психофизиологических методик. В период повышения давления и пребывания под ним врач-исследователь оценивал поведение испытуемых². Декомпрессия до нормального атмосферного давления проводилась по ступенчатому режиму, его общее время составляло 108 минут.

После окончания погружения полученные результаты подвергались статистической обработке — выполнялись сравнение и дискриминантный анализ психофизиологических данных, полученных до и в период нахождения под наибольшим давлением. Для дискриминантного анализа на первом этапе имеющаяся выборка делилась на две группы: первая (1) — устойчивые ($n=43$) и вторая (2) — неустойчивые к действию ВПДА ($n=82$). На втором этапе неустойчивых водолазов разделили на подгруппы среднеустойчивых — $n=68$ (2.1) и низкоустойчивых лиц к действию ВПДА — $n=14$ (2.2). Затем проводили расчет расстояния Махалобиса. С его помощью были получены канонические дискриминантные функции, определяющие принадлежность обследуемых к группе устойчивости на основе имеющихся данных при условии априорно известной классификации. Значимость отличий средних

¹ Мясников А.А. Устойчивость организма к декомпрессионной болезни и методы её повышения: учебное пособие. СПб.: Изд-во МАПО, 2009. 45 с. [Myasnikov A.A. The body's Resistance to decompression sickness and methods of its improvement: textbook. St. Petersburg: MAPO Publishing house, 2009, 45 p. (In Russ.)].

² Патент 2688788 С1 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/16. Способ определения степени индивидуальной устойчивости водолазов к токсическому действию азота / Д.П.Зверев, Ю.М.Бобров, А.Н.Поликарпочкин, А.Ю.Шитов.; заявка № 2018120976; заявл. 06.06.2018; опубл. 22.05.2019 // Изобретения. Полезные модели: офиц. бюл. М.: ФИПС, 2019. № 15. [Patent 2688788 C1 Russian Federation, IPC A 61 B 5/16. Method for determining the degree of individual resistance of divers to the toxic effect of nitrogen / D.P.Zverev, Yu.M.Bobrov, A.N.Polikarpochkin, A.Yu.Shitov; application no. 2018120976; application no. 06.06.2018; publ. 22.05.2019 // Inventions. Useful models: official Byul. Moscow: FIPS, 2019. No. 15. (In Russ.)].

значений дискриминантных функций оценивалась с помощью критерия Л Уилкса¹. После этого проводилась кросс-проверка перекрестно-проверяемых сгруппированных наблюдений. Для оценки качества, чувствительности и специфичности математических моделей-классификаторов проводили ROC-анализ.

Результаты и их обсуждение. Использованные в исследовании психофизиологические тесты, по данным литературы, наиболее широко применяются в практике медицинского обеспечения водолазных спусков. Исходные данные исследования представлены в табл. 1.

При давлении 0,8 МПа (70 м) по сравнению с исходными данными выявлено увеличение: количества просмотренных колец по коррек-

турной пробе с кольцами Ландольта (КПК) на 3,6%, количества ошибок по корректурной пробе с кольцами Ландольта (КОШкп) на 81,8%, количества ошибок по арифметическому тесту «сложение в уме» (КОШсл) на 100%, количества действий по арифметическому тесту «умножение в уме» (КДумн) на 2,0%, количества ошибок по арифметическому тесту «умножение в уме» (КОШумн) на 100%, количества действий по методике словесно-цветовой интерференции (тест Струпа) (КДсци) на 5,2%, количества ошибок по методике сложения и вычитания с переключением на бланке таблицы Крепелина (КОШтк) на 100%, длины квадрата со стороной в 3 см по тесту «квадраты» (ДСК-3) на 9,0%, длины

Таблица 1

Динамика изменения показателей функций центральной нервной системы при водолажном спуске в барокамере на глубину 0,8 МПа (70 м) Me [Q25; Q75]

Table 1

Dynamics of changes in the indicators of the central nervous system functions during diving descent in a pressure chamber to a depth of 0,8 MPa (70 m) Me [Q25; Q75]

Период		при нормальном давлении	под избыточным давлением
Корректурная проба с кольцами Ландольта	КПК	446 [390; 505]	462 [380; 537]*
	Кош	22 [14; 32]	40 [27; 59]**
	А	0,57 [0,48; 0,67]	0,43 [0,32; 0,53]**
Арифметический тест «сложение в уме»	КДсл	10 [8; 12]	9 [8; 12]*
	КОШсл	0 [0; 1]	1 [0; 2]**
	Мсл	0,26 [0,22; 0,31]	0,22 [0,16; 0,28]**
Арифметический тест «умножение в уме»	КДумн	24 [18; 31,25]	25 [17,5; 33]
	КОШумн	1 [0; 3]	2 [0; 3]
	Мумн	0,19 [0,09; 0,25]	0,17 [0,05; 0,23]*
Словесно-цветовая интерференция	КДсци	30 [21; 30]	29 [16; 30]
	КОШсци	0,5 [0; 2,0]	1,0 [0; 5,0]
Сложение и вычитание с переключением (тест «счет по Крепелину»)	КДтк	210 [183; 173]	198 [220; 203]*
	КОШтк	0 [0; 1]	1 [0; 2]
Арифметический тест «вычитание в уме»	КДвыч	12 [9; 14]	11 [8; 12]*
	КОШвыч	0 [0; 1]	1 [0; 2]
Тест Беннета	ПТВ	25 [20; 30]	23 [16; 30]*
	Коэфф. ТМК	0,41 [0,29; 0,51]	0,352 [0,23; 0,48]**
Тест «квадраты»	ДСК-3	3,33 [1,63; 5,03]	3,63 [2,03; 5,23]*
	ДСК-5	4,93 [3,53; 6,33]	5,73 [3,83; 7,63]*
Расстановка чисел	КЧрч	17 [14; 20]	16 [12; 19]*
	КОрч	2 [2; 4]	4 [2; 6]**
Макрография		7,2 [6,1; 7,9]	8,4 [7,3; 9,6]**

Примечания: * статистически значимые различия по сравнению с исходными данными, $p < 0,05$; ** статистически значимые различия по сравнению с исходными данными, $p < 0,01$.

Notes: * statistically significant differences compared with the initial data, $p < 0,05$; ** statistically significant differences compared with the initial data, $p < 0,01$.

¹ Гржибовский А.М., Унгурияну Т.Н. Анализ биомедицинских данных с использованием пакета статистических программ SPSS: учебное пособие. Архангельск: Изд-во Северного государственного медицинского университета, 2017. 293 с. [Grzybowski A.M., Unguryanu T.N. Analysis of biomedical data using statistical software package SPSS: a training manual. Arkhangelsk: Northern State Medical University Press, 2017, 293 p. (In Russ.).]

квадрата со стороной в 5 см по тесту «квадраты» (ДСК-5) на 16,2%, количества ошибок по методике «расстановка чисел» (Корч) на 100,0% и макрографии на 16,7%.

У следующих показателей обнаружено снижение: скорости переработки информации в зрительном анализаторе по корректурной пробе с кольцами Ландольта (Акп) на 24,6%, количества действий по арифметическому тесту «сложение в уме» (КДсл) на 10,1%, ско-

ных (10 методик) всего 2, у которых между исследуемыми группами было наибольшее расстояние Махалонобиса (D^2_{\min}). Статистическую значимость показателей оценивали при помощи дисперсионного анализа (точное значение F), который отражал вклад переменной при классификации.

В первую каноническую функцию (d_1) вошел только один показатель — скорость переработки информации в зрительном анализаторе

Таблица 2

Расчеты расстояния Махалонобиса (D^2_{\min})

Table 2

Calculations of Mahalanobis distance (D^2_{\min})

Функция	№ шага	Переменные	D^2_{\min}		Точное значение F			
			Статистика	Между группами	Статистика	ст.св1	ст.св2	Значимость
d1	1	Δa	2,896	1 и 2	81,687	1	123	$2,803 \times 10^{-15}$
d2	1	Δa	4,646	2.1 и 2.2	53,941	1	80	$1,535 \times 10^{-10}$
	2	Δm	6,077		34,834	2	79	$1,424 \times 10^{-11}$

Примечания: D^2_{\min} — минимальное значение квадрата расстояния Махалонобиса. ст. св. — степени свободы; F — мера вклада переменной в классификацию; Δa — степень изменения скорости переработки информации в зрительном анализаторе; Δm — степень изменения скорости мышления.

Notes: D^2_{\min} is the minimum value of the square of the Mahalanobis distance; st. sv. — degrees of freedom; F is a measure of the contribution of the variable to the classification; Δa — the degree of change in the speed of information processing in the visual analyzer; Δm — the degree of change in the speed of thinking.

рости мышления по арифметическому тесту «сложение в уме» (Мсл) на 14,5%, скорости мышления по арифметическому тесту «умножение в уме» (Мумн) на 11,6%, количества действий по методике словесно-цветовой интерференции (тест Струпа) (КОШсци) на 50%, количества действий по методике сложения и вычитания с переключением на бланке таблицы Крепелина (КДтк) на 5,7%, количества действий по арифметическому тесту «вычитание в уме» (КДвыч) на 12,1%, количества ошибок по арифметическому тесту «вычитание в уме» (КОШвыч) 100%, уровня тонкомышечной координации движений по тесту Беннета (ПТБ) на 9,2%, коэффициента уровня тонкомышечной координации движений по тесту Беннета (коэф. ТМК) на 12,0%, количества записанных чисел по методике «расстановка чисел» (КЧрч) на 5,9%.

Статистически значимые изменения выявлены у показателей: КПК, КДсл, Мумн, КДтк, КДвыч, ПТБ, ДСК-3, ДСК-5, КЧрч — при $p < 0,05$; КОШкп, Акп, КОШсл, Мсл, Коэф. ТМК, Корч, макрографии — при $p < 0,01$.

При дискриминантном анализе (табл. 2) в канонические функции включены из 22 перемен-

ных по корректурной пробе с кольцами Ландольта, так как показатель скорости мышления при арифметическом счете «сложение в уме» имел небольшое расстояние Махалонобиса между группами ($D^2_{\min} = 0,207$; $F = 5,848$). Во вторую каноническую функцию (d_2) были включены оба показателя.

Затем рассчитали коэффициенты для формулы первой (1) и второй канонических дискриминантных функций (2).

$$d_1 = 1,733 + 0,068 \times \Delta a, \quad (1)$$

$$d_2 = 2,965 + 0,077 \times \Delta a + 0,015 \times \Delta m, \quad (2)$$

где: Δa — скорость переработки информации в зрительном анализаторе; Δm — скорость мышления.

Средние значения центроидов групп для разделения испытуемых были следующие: для первой группы (d_1) = 1,116, для второй группы (d_2) = -0,585; у второй группы получены следующие средние значения центроидов подгрупп: ($d_{2.1}$) = 0,421 и ($d_{2.2}$) = -2,044. В последующем решение о разделении испытуемых принималось на основании близости к одному из своих цент-

роидов d_1 и d_2 ($d_{2,1}$ и $d_{2,2}$), для чего получили константу дискриминации, которая являлась значением функции, равноудаленным от центровидов d_1 и d_2 ($d_{2,1}$ и $d_{2,2}$). Константы дискриминаций d_1 и d_2 ($d_{2,1}$ и $d_{2,2}$) рассчитывались по формуле (3 и 4):

$$A(d_1) = \frac{(\bar{d}_{1,1} + \bar{d}_{2,1})}{2}, \quad (3)$$

где: A — константа дискриминации, \bar{d}_1 — значение центроида одной исследуемой группы (d_1); \bar{d}_2 — значение центроида второй исследуемой группы (d_2).

$$A(d_2) = \frac{(\bar{d}_{2,1} + \bar{d}_{2,2})}{2}, \quad (4)$$

где: A — константа дискриминации, $\bar{d}_{2,1}$ — значение центроида одной исследуемой группы ($d_{2,1}$); $\bar{d}_{2,2}$ — значение центроида второй исследуемой группы ($d_{2,2}$).

Согласно формуле (3) константа дискриминации первой дискриминантной функции составила $A_1(d_1) = 0,265$, т.е. если значение $d_1 > A_1(d_1)$, то испытуемых относили к группе 1 (высокоустойчивые), остальных — к группе 2 (невысокоустойчивые). Аналогично по формуле (4), $A_2(d_2) = -0,81169$, т.е. если значение $d_2 > A_2(d_2)$, то испытуемых относили к подгруппе 2.2 (среднеустойчивые), остальных — к подгруппе 2.1 (низкоустойчивые).

Также проводилась проверка состоятельности дискриминантных функций. Вторая дискриминантная функция (d_2) имела высокие результаты собственного значения — 0,882 и канонической корреляции ($r = 0,685$), а d_1 несколько хуже — 0,664, однако имела почти такой же уровень канонической корреляции ($r = 0,632$).

Значимость критерия Λ Уилкса для групп: d_1 — $\Lambda = 62,389$, $\chi^2 = 0,601$, $p < 0,001$; и d_2 — $\Lambda = 49,95$, $\chi^2 = 0,531$, $p < 0,001$. Следовательно, эти величины указывают на статистически значимые различия средних значений центроидов функций.

Результаты классификации канонических дискриминантных функций d_1 и d_2 выявили, что правильно были классифицированы 78,4 и 90,2% случаев соответственно. Далее проводили кросс-проверку перекрестно-проверяемых сгруппированных наблюдений. По результатам проверки значения — $d_1 = 78,3\%$ и $d_2 = 89,0\%$, которые показывают небольшой сдвиг правильно классифицированных случаев канонических дискриминантных функций. Рассчитанные канонические функции d_1 и d_2 показали достаточно высокую точность и могут быть использованы для оценки устойчивости организма к действию высоких парциальных давлений азота.

Также рассчитывали показатели чувствительности (Se) и специфичности (Sp) моделей, в результате чего получили следующие значения: $Se(d_1) = 78,0\%$, $Sp(d_1) = 79,1\%$ и $Se(d_2) = 92,9\%$, $Sp(d_2) = 89,7\%$. Эти значения отображают высокую чувствительность и специфичность моделей. Следовательно, рассчитанные канонические функции d_1 и d_2 (модели) показывают высокую точность классификации и могут быть рекомендованы для определения устойчивости организма к действию ВПДА.

Таким образом, был разработан алгоритм определения устойчивости организма к действию ВПДА, представленный на рисунке.

Порядок действия по алгоритму следующий¹. На основании переменных скорости переработки информации в зрительном анализаторе по корректурной пробе с кольцами Ландольта

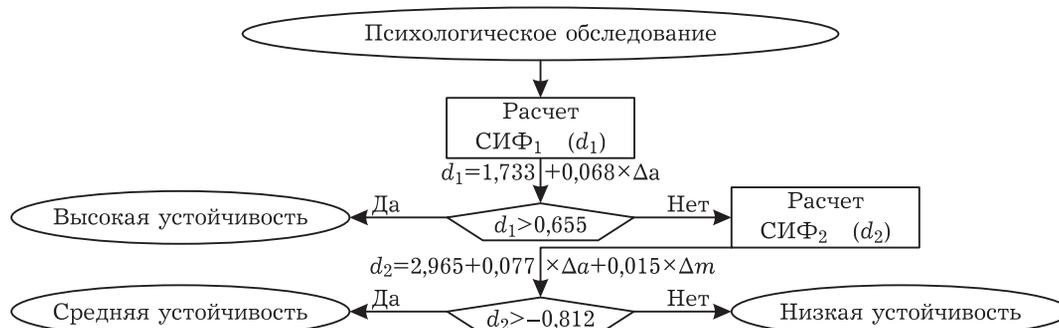


Рисунок. Алгоритм определения устойчивости организма к действию высоких парциальных давлений азота
 Примечания: Δa — степень изменения скорости переработки информации в зрительном анализаторе (%); Δm — степень изменения скорости мышления (%)

Figure. Algorithm for determining the body's resistance to the action of high partial pressures of nitrogen
 Notes: Δa — the degree of change in the speed of information processing in the visual analyzer (%); Δm — the degree of change in the speed of thinking (%)

и скорости процессов мышления по арифметическому тесту «сложение в уме» необходимо рассчитать степень изменения функционирования ЦНС при действии ВПДА, т.е. СИФ₁ (d_1) (см. формулу 1 и рисунок). Если этот показатель будет меньше 0,2655, то испытуемого относят к группе высокоустойчивых к действию ВПДА (см. рисунок). Если показатель СИФ₁ (d_1) — больше 0,2655, то необходимо произвести расчет СИФ₂ (d_2) (см. формулу 2). Если СИФ₂ (d_2) > -0,812, то испытуемого относят к среднеустойчивым, если СИФ₂ (d_2) ≤ -0,812, то к низкоустойчивым к действию ВПДА (см. рисунок).

В качестве примера использования алгоритма устойчивости к действию высоких парциальных давлений азота рассмотрим данные, полученные у водолазов «А», «В» и «С». Для этого в условиях нормального давления под наблюдением водолазного врача водолазы выполняли психофизиологические тесты: корректурную пробу с кольцами Ландольта и арифметический тест «сложение в уме». При этом у водолаза «А» $a_{исх}=0,566$ и $m_{исх}=0,214$; у водолаза «В» $a_{исх}=0,570$ и $m_{исх}=0,278$; у водолаза «С» $a_{исх}=0,672$ и $m_{исх}=0,306$.

В условиях повышенного давления (0,8 МПа) получены следующие результаты: у водолаза «А» $a_{изб}=0,468$ и $m_{изб}=0,241$, у водолаза «В» $a_{изб}=0,339$ и $m_{изб}=0,250$; у водолаза «С» $a_{изб}=0,376$ и $m_{изб}=0,195$.

Следовательно, Δa — степень изменения показателя скорости переработки информации у водолаза «А» составила $\Delta a = -17,3\%$, а $\Delta m = 12,6\%$, у водолаза «В» $\Delta a = -40,5\%$, $\Delta m = -10,1\%$, у водолаза «С» $\Delta a = -44,0\%$ и $\Delta m = -36,3\%$.

Для определения устойчивости к действию высоких парциальных давлений азота рассчи-

тываем показатели СИФ₁ и СИФ₂ по формулам 1 и 2 соответственно. У водолаза «А» СИФ₁=0,556 и СИФ₂=1,821; у водолаза «В» СИФ₁=-1,023 и СИФ₂=-0,307; у водолаза «С» СИФ₁=-1,262 и СИФ₂=-0,971.

Исходя из полученных результатов водолаз «А» оказался высокоустойчивым, водолаз «В» среднеустойчивым, а водолаз «С» — низкоустойчивым к действию высоких парциальных давлений азота.

Заключение. Водолазный спуск в барокамере под давление 0,8 МПа (70 м) с проведением психофизиологических тестов: корректурной пробы с кольцами Ландольта и арифметического теста «сложение в уме» является информативной методикой для определения устойчивости организма к действию высоких парциальных давлений азота. В результате сравнительного и дискриминантного анализов из десяти методик и двадцати двух показателей, используемых в практике медицинского обеспечения водолазных спусков, выбраны две, позволяющие с высокой долей достоверности выявить степень изменения функционирования центральной нервной системы при действии высоких парциальных давлений азота. Тем самым сокращается время нахождения испытуемых под наибольшим давлением, что при достаточном качестве исследования снижает вероятность развития бессимптомного декомпрессионного газообразования при снижении давления в барокамере до атмосферного.

Таким образом, усовершенствованный подход к определению устойчивости организма к токсическому действию высоких рN₂, позволит повысить качество и безопасность медицинского отбора водолазов.

Литература/References

1. Семенов В.Н., Иванов И.В. Функциональные тесты как важное направление сохранения здоровья водолазов // *Медицина труда и промышленная экология*. 2019. Т. 59, № 9. С. 745. [Sementsov V. N., Ivanov I.V. Functional tests as an important direction of divers' health preservation. *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, Vol. 59, No. 9, p. 745 (In Russ.)]. doi: 10.31089/1026-9428-2019-59-9-745-746.

¹ Патент на изобретение 2712067 С1 Российская Федерация, МПК А 61 В 5/00. Способ определения устойчивости организма человека к действию высоких парциальных давлений азота по изменению скорости переработки информации в зрительном анализаторе: патент на изобретение / Д.П.Зверев, И.Р.Кленков, А.Ю.Шитов, К.Ю.Сапожников; заявка № 2019122523; заявл. 15.07.2019; опублик. 24.01.2020 // Изобретения. Полезные модели: офиц. бюл. М.: ФИПС, 2020. № 3. [Patent for invention 2712067 С1 Russian Federation, IPC А 61 В 5/00. A method for determining the stability of the human body to the action of high partial nitrogen pressures by changing the speed of information processing in the visual analyzer: patent for the invention / D.P.Zverev, I.R.Klenkov, A.Yu.Shitov, K.Yu.Sapozhnikov; application no. 2019122523; application no. 15.07.2019; publ. 24.01.2020 // Inventions. Useful models: ofits. Byul. Moscow: FIPS, 2020, No. 3. (In Russ.)].

2. Голосов С.Ю., Семенцов В.Н., Ковалев С.А., Головкин В.Б. *Оценка устойчивости водолазов к некоторым факторам гипербарической среды* / под ред. И.В.Бухтиярова, В.А.Рогожника. М.: ПМГУ им. И.М. Сеченова, 2020. 26 с. [Golosov S.Yu., Sementsov V.N., Kovalev S.A., Golovkin V.B. *Assessment of the stability of divers to some factors of the hyperbaric environment* / Ed. by I.V.Bukhtiyarov, V.A.Rogozhnikov. Moscow: PMGU Sechenov state university, 2020, 26 p. (In Russ.)].
3. Зверев Д.П., Мясников А.А., Шитов А.Ю., Андрусенко А.Н. Для спасения на воде и под водой Актуальные вопросы преподавания «водолазной медицины» // *Вестник военного образования*. 2017. № 6 (9). С. 38–43. [Zverev D.P., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Andrusenko A.N. For rescue on water and under water Topical issues of teaching «diving medicine». *Bulletin of military education*, 2017, № 6 (9), pp. 38–43 (In Russ.)].
4. Damant G.C.C. Physiological effects of work in compressed air // *Nature Publishing Group*. 1930. Vol. 126, No. 3181. P. 606–608.
5. Behnke A.R., Thomson R.M., Motley E.P. The psychologic effects from breathing air at 4 atmospheres pressure // *Am. J. Physiol.-Leg. Content*. 1935. Vol. 112, No. 3. P. 554–558.
6. Edmonds C., Lawry C., Pennefather J. Nitrogen narcosis // *Diving Med. Cent. Publ.* 2nd ed. Syd. Aust. 1981. P. 197–208.
7. Лазарев Н.В. *Биологическое действие газов под давлением*. Л.: ВММА, 1941. 935 с. [Lazarev N.V. *Biological action of gases under pressure*. Leningrad: VMMA, 1941, 935 p. (In Russ.)].
8. Ветош А.Н. *Биологическое действие азота*: монография. СПб., 2003. 231 с. [Vetosch A.N. *The biological effect of nitrogen*: monograph. St. Petersburg, 2003, 231 p. (In Russ.)].
9. 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. С. 129–133. [Bykov V.N., Vetryakov O.V., Tsygan V.N., Halimov Yu.Sh., Anokhin A.G., Fateev I.V., Kaltygin M.V., Tolstoy O.A. Assessment of the resistance of military personnel to hypoxia against the background of hypobaria and high physical activity. *Bulletin of the Russian military medical Academy*, 2017, No. 3, pp. 129–133 (In Russ.)].
10. Зальцман Г.Л. Описание внешних проявлений гипербарического (азотного, водородного, аргонного и гелиевого) наркоза у животных // *Гипербарические эпилепсия и наркоз*. 1968. С. 186–196. [Salzman G.L. Description of external manifestations of hyperbaric (nitrogen, hydrogen, argon and helium) anesthesia in animals. *Hyperbaric epilepsy and anesthesia*, 1968, pp. 186–196 (In Russ.)].
11. Юнкин И.П., Апанасенко Г.Л., Соколов Г.М. Основные принципы профессионального отбора водолазов // *Человек и животные в гипербарических условиях*. 1980. С. 148–180. [Yunkin I.P., Apanasenko G.L., Sokolov G.M. Basic principles of professional selection of divers. *Man and animals in hyperbaric conditions*. 1980, pp. 148–180 (In Russ.)].
12. Бобров Ю.М., Поликарпочкин А.Н., Юнкин И.П. Устойчивость человека к наркотическому действию азота в условиях повышенного давления и некоторые способы ее определения // *Индифферентные газы в водолазной практике, биологии и медицине*. М.: Слово, 2000. С. 13. [Bobrov Yu.M., Polikarpochkin A.N., Yunkin I.P. Human Resistance to the narcotic effect of nitrogen under high pressure and some ways to determine it. *Indifferent gas in diving practice, biology and medicine*. Moscow: Publishing house Slovo, 2000, p. 13. (In Russ.)].
13. Поликарпочкин А.Н., Юнкин И.П. Оценка устойчивости организма человека к наркотическому действию азота с помощью закиси азота // *Проблемы работоспособности в условиях повышенного давления*. Л.: ВМА, 1989. С. 56. [Polikarpochkin A.N., Yunkin I.P. Assessment of the human body's resistance to the narcotic effect of nitrogen using nitrous oxide. *Performance problems in high-pressure conditions*. Leningrad: VMA, 1989, p. 56. (In Russ.)].
14. Следков А.Ю. *Глубинное опьянение*: монография. СПб.: ОТИМ, 1999. 48 с. [Sledkov A.Yu. *Deep intoxication*: monograph. St. Petersburg: Publishing house OTIM, 1999, 48 p. (In Russ.)].
15. Зверев Д.П., Бобров Ю.М., Андрусенко А.Н., Шитов А.Ю., Чернов В.И. Методические аспекты оценки устойчивости человека к токсическому действию азота // *Клиническая патофизиология*. 2019. № 2 (25). С. 21–25. [Zverev D.P., Bobrov Yu.M., Andrusenko A.N., Shitov A.Yu., Chernov V.I., Klenkov I.R. Methodological aspects of assessing human resistance to the toxic effects of nitrogen. *Clinical pathophysiology*. 2019, No. 2 (25), pp. 21–25 (In Russ.)].
16. Федоров Е.В., Ятманова Т.М., Ятманов А.Н. Оценка психофизиологических показателей у водолазов-профессионалов и аквалангистов-любителей устойчивых и неустойчивых к декомпрессионному воздействию // *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути решения*. 2015. Т. 10, № 1. С. 439–441. [Fedorov E.V., Yatmanova T.M., Yatmanov A.N. Evaluation of psychophysiological indicators in professional divers and Amateur scuba divers resistant and unstable to decompression effects. *Health—the basis of human potential: problems and solutions*, 2015, Vol. 10, No. 1, pp. 439–441 (In Russ.)].

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 07.09.2020 г.

Авторство:

Вклад в концепцию и план исследования — Д.П.Зверев, И.Р.Кленков, А.А.Мясников. Вклад в сбор данных — Д.П.Зверев, И.Р.Кленков, А.Ю.Шитов, А.В.Старков, К.В.Логунов. Вклад в анализ данных и выводы — И.Р.Кленков, А.А.Мясников, А.В.Фисун, К.В.Логунов. Вклад в подготовку рукописи — Д.П.Зверев, И.Р.Кленков, А.А.Мясников, А.Ю.Шитов, А.В.Фисун.

Сведения об авторах:

Зверев Дмитрий Павлович — кандидат медицинских наук, доцент, полковник медицинской службы, начальник 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: z.d.p@mail.ru; SPIN: 7570–9568; ORCID 0000–0003–3333–6769;

Кленков Ильяс Рифатович — майор медицинской службы, адъюнкт 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: fugazik@mail.ru; SPIN: 9827–8535; ORCID 0000–0002–1465–1539;

Мясников Алексей Анатольевич — доктор медицинских наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы РФ, полковник медицинской службы запаса, профессор кафедры (физиологии подводного плавания) Федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 1194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева д. 6; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru; SPIN: 2590–0429; ORCID 0000–0002–7427–0885;

Шитов Арсений Юрьевич — кандидат медицинских наук, подполковник медицинской службы, 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; SPIN: 7390–1240; ORCID 0000–0002–5716–0932; Web of Science Researcher ID: O-3730–2017;

Фисун Антон Валерьевич — подполковник медицинской службы, начальник факультета подготовки врачей для Военно-Морского Флота 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;

Старков Александр Васильевич — полковник медицинской службы запаса, заведующий кафедрой мобилизационной подготовки здравоохранения и медицины катастроф Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П.Павлова»; 197101, Санкт-Петербург, ул. Л.Толстого, д. 6–8; e-mail: stark-4@mail.ru; SPIN 1687–8108;

Логунов Константин Валерьевич — профессор, доктор медицинских наук, преподаватель медицинского колледжа Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», начальник отдела стандартизации медицинской помощи Клиники высоких медицинских технологий им. Н.И.Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»; 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9; руководитель консультационной службы Общества с ограниченной ответственностью «Медикон»; 198188, Санкт-Петербург, ОПС-188, а/я 16; e-mail: logounov@mail.ru; SPIN: 7840–9578, ORCID: 0000–0001–8284–8678.