

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИЙ ОРГАНИЗМА ВОДОЛАЗОВ С РАЗЛИЧНОЙ УСТОЙЧИВОСТЬЮ К ТОКСИЧЕСКОМУ ДЕЙСТВИЮ КИСЛОРОДА: ПРОСПЕКТИВНОЕ КОГОРТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Д. П. Зверев[✉], З. М. Исрафилов[✉], А. А. Мясников[✉], А. Ю. Шитов^{✉*}, В. И. Чернов[✉]
Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

ВВЕДЕНИЕ: Актуальность данной работы обусловлена тем, что в настоящее время в мире нет единого понимания степени влияния высоких парциальных давлений кислорода на состояние функций организма человека в зависимости от его индивидуальной устойчивости.

ЦЕЛЬ: Исследовать состояние функций центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем у лиц с различной устойчивостью к токсическому действию кислорода в период спуска и в ближайший послеспусковой период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: Проведено обследование 11 водолазов в возрасте от 23 до 43 лет (средний возраст составил $35,5 \pm 6,5$ лет) в условиях имитационного спуска в барокамере на глубину 15 м (0,25 МПа) при дыхании кислородом, а также в течение трех суток после его окончания.

Статистика: Для статистической обработки результатов применялось программное обеспечение SPSS, v. 20.0 (IBM).

РЕЗУЛЬТАТЫ: Исходный уровень частоты сердечных сокращений (ЧСС) в группе низкоустойчивых к токсическому действию кислорода (группа I) по сравнению с показателем в группе испытуемых, признанных устойчивыми (группа II), выше на 10% ($p < 0,05$). К 60-й минуте дыхания кислородом ($pO_2 = 0,25$ МПа) наблюдается снижение ЧСС на 12,5% в группе I и 11% в группе II по сравнению с исходным уровнем ($p < 0,05$). Уровень диастолического давления в группе II возрос на 10,5% к 15-й минуте спуска и на 18% к 45-й минуте по сравнению с исходными значениями ($p < 0,05$). В группе I уровень пульсового давления снизился на 18% по сравнению с исходными значениями ($p < 0,05$). Результаты пробы Генча после спуска увеличились на 55% в группе I и на 62,5% в группе II по сравнению с исходными значениями ($p < 0,05$), а показатели выше исходных сохранялись еще в течение трех суток. В группе I выявлено снижение скорости переработки информации зрительным анализатором на 16% (s с 0,788 до 0,661 б/с) и увеличение латентного времени простой зрительно-моторной реакции на 11,7% по сравнению с исходными показателями ($p < 0,05$).

ОБСУЖДЕНИЕ: У водолазов, имеющих различную устойчивость к токсическому действию кислорода, наблюдаются разнонаправленные реакции со стороны центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем организма. Лица, устойчивые к токсическому действию кислорода, характеризуются более активным включением механизмов противодействия гипероксии и достоверным снижением уровня адаптационных резервов и работоспособности сердечно-сосудистой системы. У лиц с низкой устойчивостью отмечается снижение уровня функциональных возможностей центральной нервной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Полученные результаты обосновывают допустимость применения метода определения индивидуальной устойчивости организма человека к токсическому действию кислорода и пробы с возрастающей дозированной физической нагрузкой с целью оценки уровня адаптационных резервов и работоспособности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, водолаз, функциональное состояние, гипербарический кислород, отравление кислородом, парциальное давление

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

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

Для цитирования: Зверев Д.П., Исрафилов З.М., Мясников А.А., Шитов А.Ю., Чернов В.И. Исследование состояния функций организма водолазов с различной устойчивостью к токсическому действию кислорода // *Морская медицина*. 2022. Т. 8, № 3. С. 30–39, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-3-30-39>.

For citation: Zverev D.P., Israfilov Z.M., Myasnikov A.A., Shitov A.Yu., Chernov V.I. Research of diver body functions' state with different resistance to the toxic oxygen effect: prospective cohort study // *Marine medicine*. 2022. Vol. 8, No. 3. P. 30–39, DOI: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2022-8-3-30-39>.

RESEARCH OF DIVER BODY FUNCTIONS' STATE WITH DIFFERENT RESISTANCE TO THE TOXIC OXYGEN EFFECT: PROSPECTIVE COHORT STUDY

Dmitriy P. Zverev[✉], Zagir M. Israfilov[✉], Aleksey A. Myasnikov[✉], Arseniy Yu. Shitov^{✉*},
Vasily I. Chernov[✉]

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

INTRODUCTION: The relevance of this issue is due to the fact that nowadays there is no common understanding of the influence degree of high partial oxygen pressures on a body functions' state, depending on individual resistance.

OBJECTIVE: Research the state of the functions of the central nervous, cardiovascular and respiratory systems among people with different resistance to the toxic oxygen effect in the descending and the nearest post-descending period.

MATERIALS AND METHODS: There was an examination of 11 divers aged 23 to 43 (the average age is 35.5 ± 6.5 years) in conditions of a simulated descent in a pressure chamber to the depth of 15 m (0.25 MPa) while breathing oxygen, and also during 3 days after its termination.

Statistic: Software SPSS, v. 20.0 (IBM) was applied for statistical processing of the results.

RESULTS: Baseline heart rate (HR) in the low toxic oxygen resistant group (group I) is 10% ($p < 0.05$) higher than the subjects, recognized as resistant (group II). To 60 minutes oxygen breathing ($pO_2 = 0.25$ MPa) there is a decrease in heart rate (HR) by 12.5% in group I and 11% in group II, comparing the baseline ($p < 0.05$). An increase of diastolic pressure level in group II is 10.5% to 15 min descent and 18% to 45 min, comparing the baseline ($p < 0.05$). In group I the pulse pressure level reduced by 18%, comparing the baseline ($p < 0.05$). Gencha test results after descent rose by 55% in group I and by 62.5% in group II, comparing the baseline ($p < 0.05$), and indicators higher than initial remained for 3 days more. In group I there was reduction of information processing speed by a visual analyzer of 16% (from 0.788 to 0.661 b/sec) and increase in escape latency of a simple visual-motor reaction by 11.7%, comparing the baseline ($p < 0.05$).

DISCUSSION: Divers with different resistance to the toxic oxygen effect experience multidirectional reaction of the central nervous, cardiovascular and respiratory systems. Individuals, resistant to the toxic oxygen effect, are characterized by more active inclusion of counteraction mechanisms to hyperoxia and significant reduction in the level of adaptation reserves and the efficiency of the cardiovascular system. People with low resistance experience a decrease in the functionality level of the central nervous system.

CONCLUSION: The results obtained have a basis for admitting the application of the method of determining individual body resistance to the toxic oxygen effect and tests with increasing dosed physical activity in order to estimate adaptation reserves and efficiency.

KEYWORDS: marine medicine, diver, functional state, hyperbaric oxygen, oxygen poisoning, partial pressure

Введение. Работа водолаза остается одним из самых опасных видов профессиональной деятельности человека и связана с комплексным воздействием на организм целого ряда разнонаправленных факторов, обусловленных физико-химическими свойствами окружающей среды, характеристиками применяемого водолазного снаряжения, составом дыхательных газовых смесей и др. [1, с. 500–503; 2, с. 482–483; 3, с. 117–120]. На протяжении всего водолазного спуска эти

факторы действуют на организм водолаза, часто потенцируя неблагоприятное действие друг друга, вследствие чего в организме происходят различные по степени выраженности сдвиги в функционировании органов и систем, а в отдельных случаях обуславливают развитие специфических и неспецифических водолазных заболеваний [4, с. 371–376; 5, с. 149–153].

Анализ деятельности водолазов в России показывает, что водолазные работы, выполняемые

на малых и средних глубинах, составляют более 90% от общего объема водолазных работ, а численность водолазов занятых этими работами, достигает 95–98%. Отличительной особенностью водолазной деятельности последних лет стало осуществление повторных спусков в течение суток. Многократные спуски в течение суток не только создают опасность бессимптомного декомпрессионного газообразования, но и увеличивают вероятность развития декомпрессионной болезни, составляющей более 90% от общего числа профессиональных заболеваний водолазов [6, с. 19–20], при этом смертность в результате несчастных случаев при проведении водолазных работ составляет 0,1–2% в год [7, с. 28–29].

В связи с этим перед водолазной медициной стоят задачи разработки и внедрения мероприятий, направленных на повышение безопасности и эффективности водолазного труда на малых и средних глубинах, а также сохранение здоровья и повышение работоспособности водолазов. Одним из направлений профилактики развития декомпрессионной болезни является ограничение поступления азота в организм водолаза. Очевидно, что применение дыхательных смесей с низким парциальным давлением азота или его полным замещением приводит к снижению уровня насыщения тканей организма азотом, а следовательно, уменьшает риск развития декомпрессионного газообразования и время декомпрессии водолазов в целом [8, с. 26–29].

Специалистами Военно-морского флота, а также силовых ведомств страны стало активно использоваться регенеративное водолазное снаряжение (с замкнутой и полузамкнутой схемами дыхания) с применением для дыхания гипероксических искусственных газовых смесей. По сравнению с другими видами водолазного снаряжения регенеративное обладает рядом преимуществ, среди которых — обеспечение скрытности передвижений при выполнении водолазных работ и отсутствие необходимости проведения длительной декомпрессии в конце спуска, что особенно важно при выполнении специальных задач. Применение регенеративного водолазного снаряжения на малых глубинах с использованием для дыхания кислорода полностью исключает риск развития декомпрессионной болезни, однако создается высокий риск развития ряда специфических водолазных заболеваний, прежде всего отравления кислородом [9, с. 1–6; 10, с. 419–420].

Под отравлением кислородом понимается патологическое состояние организма, развивающееся в результате воздействия на него повышенного парциального давления кислорода и проявляющееся в нарушении функций центральной нервной (ЦНС), сердечно-сосудистой, дыхательной и эндокринной систем. Поражающий эффект гипероксии определяется величиной парциального давления кислорода и временем его воздействия, что позволяет считать этот газ ядом хроноконцентрационного действия [11, с. 496].

В проанализированной литературе содержатся противоречивые данные о динамике состояния функций организма человека при кратковременном воздействии кислорода под повышенным давлением. При этом понять, каким образом влияет дыхание кислородом под повышенным давлением на состояние функций организма водолазов, можно только исследовав изменения наиболее нагруженных (лимитирующих) систем организма у лиц, имеющих различную устойчивость к данному неблагоприятному фактору водолазного труда, с этапом последствия и физической нагрузкой.

Физиологические реакции организма человека на повышенное давление кислорода на системном уровне более значительно развиваются со стороны ЦНС, сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Предполагается, что конечная цель этих реакций — ограничение избыточного поступления кислорода в ткани организма.

Целью данной работы является исследование состояния функций организма у водолазов с различной устойчивостью к ТДК в период спуска и в ближайший послеспусковой период.

Материалы и методы. Проведено обследование 11 здоровых мужчин в возрасте от 23 до 43 лет (средний возраст составил $35,5 \pm 6,5$ лет), проходящих военную службу на должностях водолазов. Динамику функционального состояния организма испытуемых определяли путем регистрации показателей ЦНС, сердечно-сосудистой и дыхательной систем до, во время и после имитационного спуска в барокамере под давлением 0,25 МПа при дыхании кислородом.

Перед имитационным спуском в отдельном помещении с температурой воздуха 21–22° С обследуемым в покое производили регистрацию ЧСС, систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления. На осно-

вании полученных данных рассчитывали пульсовое давление, ударный объем и минутный объем крови (МОК), по методу Стара, а также вегетативный индекс Кердо [12, с. 31–42], с целью оценки вегетативной регуляции сердечной деятельности. Для оценки уровня устойчивости к гипоксии и анаэробных возможностей организма применялась стандартизованная проба с максимально возможной задержкой дыхания на выдохе (проба Генча)¹.

Далее производили регистрацию показателей состояния функций вегетативной и центральной нервной системы с использованием устройства психофизиологического тестирования УПФТ-1/30 — «Психофизиолог» (методики вариационной кардиоинтервалометрии) [13, с. 73–80; 14, с. 543–550], простой зрительно-моторной реакции (ПЗМР) и бланковых методик исследования внимания и мышления (корректирующая проба с кольцами Ландольта, «расстановка чисел», «сложение в уме»). При выполнении методики ПЗМР в качестве стимулов в приборе использовались световые импульсы (загорание зеленого индикатора) на передней панели пульта УПФТ. При оценке состояния функций ЦНС использовались два статистических параметра: среднее время ответной реакции и его среднеквадратичное отклонение (СКО). При этом уровень функциональных возможностей ЦНС определялся по среднему времени ответной реакции, а церебральный гомеостаз — по среднеквадратичному отклонению.

Динамику изменения функций внешнего дыхания регистрировали по 27 показателям с помощью спирографа микропроцессорного портативного СМП-21/01-«Р-Д».

Активно используемые на современном этапе пробы, направленные на оценку работоспособности сердца при дозированной физической нагрузке [15, с. 113–120], не в полной мере отражают влияние возрастающей физической нагрузки на водолазов в условиях работы под водой (повышенная плотность окружающей среды, подводное течение и др.). В связи с этим нами проводились функциональные пробы с дозированной физической нагрузкой в два этапа. У испытуемого, находящегося

в положении сидя в течение 5 минут, определяли ЧСС за 15 секунд. На первом этапе испытуемый выполнял 20 глубоких приседаний за 30 с. Во время трехминутного отдыха регистрировали ЧСС за первые и последние 15 секунд каждой минуты. Сразу после этого выполнялся второй этап — 40 глубоких приседаний за 60 секунд, с регистрацией ЧСС в первые и последние 15 секунд каждой из трех минут отдыха.

Исследуемые совместно с водолазным врачом размещались в поточно-декомпрессионной барокамере ПДК-2, в которой повышалось давление воздухом до 0,25 МПа. При достижении максимального давления обследуемых переводили на дыхание 100% медицинским кислородом через маску. Каждые 15 минут регистрировали ЧСС и АД, вычисляли минутный объем кровообращения по формуле Старра и проводили бланковые методики исследования функций ЦНС. По истечении 75 минут дыхания кислородом водолазов переводили на дыхание воздухом и снижали давление в барокамере. После выхода из барокамеры и в течение трех суток после повторно выполняли исследования по методикам, проводимым до имитационного спуска.

По методике определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода (ТДК)², разработанной на кафедре физиологии подводного плавания Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова, испытуемые были разделены на две группы. Группу I составили испытуемые с низкой устойчивостью к ТДК, МОК которых стал увеличиваться в первые 45 минут дыхания гипербарическим кислородом, во группу II (устойчивые) были включены лица со средней и высокой устойчивостью к ТДК, МОК которых начал увеличиваться после 45-й минуты.

Для проведения статистического анализа результатов использовалась ПЭВМ с пакетом статистических программ SPSS, v. 20.0 (IBM) [16, с. 36–50]. Количественные данные проверялись на соответствие теоретическому закону распределения Гаусса–Лапласа по критерию Шапиро–Уилка, в результате чего были выявлены множественные отклонения распределений

¹ Бобров Ю.М., Кулешов В.И., Мясников А.А. Сохранение и повышение военно-профессиональной работоспособности специалистов флота в процессе учебно-боевой деятельности и в экстремальных ситуациях: учебное пособие / под ред. Ю. М. Боброва, В. И. Кулешова, А. А. Мясникова. СПб.: ВМедА, 2015. 203 с.

² Шитов А.Ю., Кулешов В.И., Макеев Б.Л. Способ определения степени устойчивости человека к гипероксической гипоксии. Патент RU2 417 788C1. 03.11.2009.

от нормального, вследствие чего использовались методы непараметрической статистики. Для описательной статистики производился расчет медианы и интерквартильного размаха — Me [Q25%; Q75%]. Определялись различия в показателях до, во время и после дыхания гипербарическим кислородом внутри групп, и межгрупповые.

Результаты и их обсуждение. При определении устойчивости к ТДК из 11 испытуемых 5 имели низкую устойчивость (45,5%), 5 (45,5%) — среднюю и 1 (9%) высокую.

Анализ динамики показателей функции внешнего дыхания после воздействия гипербарического кислорода достоверных различий по сравнению с исходными показателями не выявил, что подтверждается результатами зарубежных исследований [17, с. 699–703]. Исходный уровень ЧСС у низкоустойчивых был на 10% выше по сравнению с испытуемыми признанными устойчивыми к ТДК. К 60-й минуте наблюдается достоверное снижение уровня ЧСС на 12,5% и 11% в группах I и II соответственно по сравнению с исходными значениями, при этом в группе I достигнутый уровень ЧСС сохраняется до конца спуска ($p < 0,05$) и в течение трех суток после его окончания, а в группе II уровень ЧСС после окончания спуска повышался практически до исходных значений.

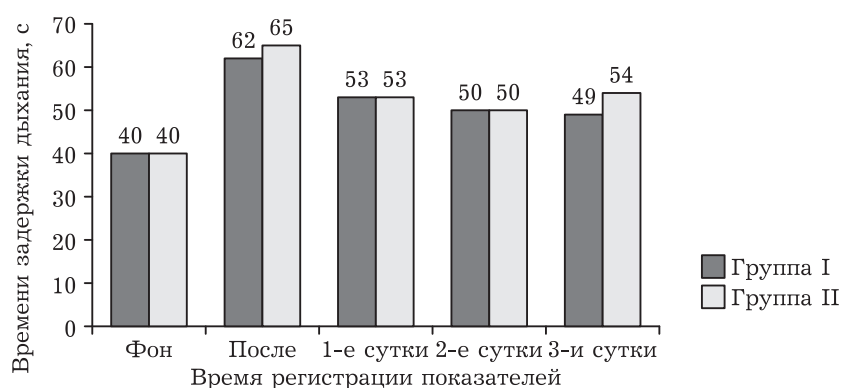


Рис. 1. Динамика показателя пробы Генча у испытуемых после дыхания $pO_2=250$ кПа
Fig. 1. Dynamics of the Gench test index in subjects after breathing $pO_2=250$ kPa

Систолическое артериальное давление у испытуемых в период дыхания гипербарическим кислородом достоверно не изменялось. Что касается диастолического давления, то в группе II к 15-й минуте спуска наблюдалось достоверное повышение на 10,5% по сравнению с исходными показателями, а к 45-й минуте спуска прирост составил уже 18%. Однако после окончания спуска наблюдалось его снижение ($p < 0,05$). В группе I рост ДАД на 7,7% наблюдался только после окончания спуска.

Повышение уровня диастолического давления в группе II свидетельствует о том, что защитные реакции организма на поступление избыточного кислорода в организм у них включаются значительно раньше по сравнению с испытуемыми с низкой устойчивостью.

Уровень пульсового давления в процессе дыхания сжатым кислородом в группе I снизился на 18% ($p < 0,05$), в то время как в группе II значимых изменений не наблюдался.

Значения ударного объема в обеих группах возрастали в пределах 7% ($p < 0,05$) от исходных показателей уже с первых минут дыхания кислородом под повышенным давлением и сохранялись на протяжении всего периода спуска.

Анализ результатов пробы Генча, отражающей уровень развития устойчивости к гипоксии и анаэробных возможностей организма, представлен на рис. 1. Исходные результаты пробы Генча в обеих группах не различались и составляли 40 секунд. После окончания спуска отмечается увеличение продолжительности времени задержки дыхания у испытуемых группы I на 55%, группы II — на 62,5%. Изменения статистически значимы в обеих группах ($p < 0,05$). В течение суток после спуска показатели пробы Генча в обеих группах сохранялись выше исходных значений на 32,5%,

на третьи сутки увеличение времени задержки дыхания сохранялось на уровне 22,5% в группе I и 35% в группе II по сравнению с исходными значениями.

Результаты оценки уровня адаптационных резервов и функциональной работоспособности сердечно-сосудистой системы представлены в табл. 1.

Перед проведением спуска уровень ЧСС после 1-го этапа физической нагрузки повысился на 67% в группе I и на 49% в группе II.

Таблица 1

Уровень изменения частоты сердечных сокращений у испытуемых после выполнения двухэтапной пробы с дозированной физической нагрузкой, Me (Q25; Q75)

Table 1

The level of change in heart rate in subjects after performing a two-stage test with dosed physical activity, Me (Q25; Q75)

Показатель	Группа I							Группа II						
	исходные значения	1-я минута	2-я минута	3-я минута	исходные значения	1-я минута	2-я минута	3-я минута	исходные значения	1-я минута	2-я минута	3-я минута		
Первый этап														
Исходные значения	70 [69; 75]	67	20	17	11	5	5	69 [62; 72]	49	30	22	17	12	4
После спуска	67 [62; 68]	54	15	13	3	3	0	66 [65; 71]	60	30	23	13	15	11
1-е сутки	67 [66; 71]	57	13	16	1	-1	-3	69 [67; 71]	70	38	30	28	17	5
2-е сутки	72 [65; 72]	56	35	21	7	-1	-4	69 [64; 73]	64	33	27	21	15	7
3-и сутки	72 [65; 75]	61	39	25	11	3	0	82 [69; 82]	45	15	11	6	1	-2
Второй этап														
Исходные значения	74 [67; 89]	77	38	20	20	15	5	72 [68; 75]	81	50	45	34	31	27
После спуска	67 [59; 80]	85	34	31	21	19	13	73 [68; 75]	75	44	40	33	28	18
1-е сутки	64 [60; 83]	94	50	41	30	27	22	73 [65; 79]	81	60	57	35	30	26
2-е сутки	68 [56; 80]	90	47	29	24	21	9	74 [63; 81]	67	41	36	24	21	16
3-и сутки	72 [60; 83]	86	44	26	22	19	8	80 [71; 87]	71	47	41	33	30	26

Примечание: первый этап — 20 приседаний за 30 секунд; второй этап — 40 приседаний за 60 секунд; исх. ЧСС, уд/мин, Me [Q25%; Q75%]; цифрами в таблице указан уровень роста ЧСС, % — относительно исходных значений. Между значениями первого и второго этапов выявлена прямая сильная корреляционная связь.

Note: the first stage — 20 squats in 30 seconds; the second stage — 40 squats in 60 seconds; ex. Heart rate — beats/min, Me [Q25%; Q75%]; the numbers in the table indicate the level of heart rate growth, % — relative to the initial values. A direct strong correlation was revealed between the values of the first and second stages.

К концу третьей минуты уровень ЧСС восстанавливался практически до исходных значений в обеих группах. После спуска рост ЧСС в группах I и II составил 54% и 60% соответственно. Восстановление уровня ЧСС в группе I наблюдалось уже к концу второй минуты отдыха, а выявленные изменения сохранялись в течение двух суток после спуска. В группе II восстановление уровня ЧСС до исходных значений в первые три минуты отдыха отмечалось только на третьи сутки после спуска. Второй этап физической нагрузки показал более значимый рост уровня ЧСС в обеих группах. При этом отмечается тенденция более раннего восстановления уровня ЧСС в группе I.

Анализ исходных показателей вегетативного индекса Кердо указывал на смещение вегетативного баланса в сторону усиления парасимпатического звена регуляции сердечного ритма в группе II, в то время как в группе I преобладало преимущественно симпатическое влияние (рис. 2). В процессе дыхания гипербарическим кислородом в обеих группах наблюдалось увеличение парасимпатического влияния. Эта ре-

акция организма расценивается как компенсаторная. В большей степени сдвиги наблюдаются в группе II. Полученные данные согласуются с результатами исследований других авторов [18, с. 47–55; 19, с. 101–156].

При психофизиологическом тестировании выявлено достоверное снижение скорости переработки информации при выполнении пробы с кольцами Ландольта на 16% (с 0,788 до 0,661 б/сек) к 60-й минуте в группе I. После окончания спуска скорость переработки информации возрастала практически до исходных значений. В группе II изменений не выявлено. По результатам тестов «сложение в уме» и «расстановка чисел» значимых изменений по сравнению с исходными данными не выявлено в обеих группах.

У испытуемых группы I (низкоустойчивые к ТДК) после спуска выявлено достоверное увеличение ($p < 0,05$) латентного времени простой зрительно-моторной реакции на 11,7% по сравнению с исходными показателями. Среднеквадратическое отклонение времени реакции в обеих группах не изменялось.

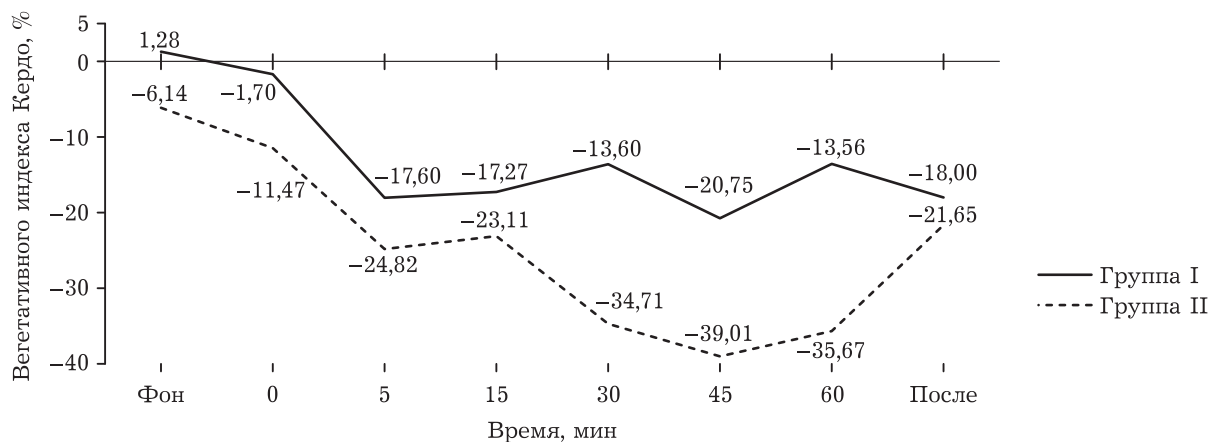


Рис. 2. Динамика межгрупповых различий индекса Кердо у испытуемых в процессе дыхания $pO_2=250$ кПа
Fig. 2. Dynamics of intergroup differences in the Kerdo index in subjects, during respiration $pO_2=250$ kPa

Результаты анализа применения методики вариационной кардиоинтервалометрии представлены на рис. 2. После спуска выявлено достоверное увеличение средней длительности интервалов R–R и снижение ЧСС по сравнению с исходными показателями в обеих группах.

Заключение. У испытуемых, имеющих различную устойчивость к токсическому дей-

ствию кислорода, после дыхания кислородом $pO_2=250$ кПа наблюдаются разнонаправленные реакции со стороны центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем организма. Для лиц, устойчивых к токсическому действию кислорода, характерно более активное включение защитных компенсаторных механизмов, направленных на уменьшение по-

Таблица 2

Динамика показателей вариационной кардиоинтервалометрии у испытуемых с различной устойчивостью к токсическому действию кислорода

Table 2

Dynamics of indicators of variation cardiointervalometry in subjects with different resistance to the toxic effects of oxygen

Показатель	Группа I					Группа II				
	до спуска	после спуска	1 день	2 дня	3 дня	до спуска	после спуска	1 день	2 дня	3 дня
Уровень функционального состояния	3,2 [2; 4]	3,2 [2; 4]	2,6 [2; 3]	2,6 [2; 3]	3 [3; 3]	3,5 [2; 5]	2,5 [2; 4]	4 [4; 4]	2 [2; 3]	3 [2; 3]
Оценка функционального состояния	0,75 [0,15; 0,75]	0,75 [0,11; 0,75]	0,38 [0,11; 0,5]	0,11 [0,11; 0,38]	0,38 [0,11; 0,5]	0,535 [0,11; 0,96]	0,305 [0,11; 0,75]	0,75 [0,75; 0,75]	0,11 [0,11; 0,5]	0,5 [0,11; 0,5]
RRNN	760 [712; 808]	829 [816; 900]*	785 [694; 825]	841 [670; 889]	820 [740; 870]	804,5 [758; 917]	857,5 [818; 951]*	798 [718; 840]	815 [731; 933]	779 [693; 862]
СКО (SDNN)	42 [31; 57]	52 [30; 85]	47 [24; 70]	42 [21; 73]	49 [22; 78]	65 [43; 78]	73,5 [54; 90]	53 [38; 59]	68 [31; 95]	68 [23; 83]
ЧСС (HR)	79 [73; 84]	72 [67; 72]*	76 [73; 85]	71 [67; 88]	75 [69; 79]	74,5 [65; 79]	70 [63; 73]*	75,5 [71; 84]	74 [64; 82]	77 [70; 87]
Ошибки	4 [0; 13]	4 [3; 8]	0 [0; 2]	2 [1; 6]	4 [4; 6]	8 [2; 9]	2,5 [0; 11]	1 [0; 3]	3,5 [2; 10]	4 [3; 9]

Примечание: RRNN — математическое ожидание средней длительности интервалов R–R; СКО (SDNN) — среднее квадратичное отклонение случайной величины; ЧСС (HR) — частота сердечных сокращений, уд/мин; * статистически значимые различия по сравнению с исходными данными, $p < 0,05$.

Note: RRNN is the mathematical expectation of the average duration of R–R intervals; SDNN is the mean square deviation of a random variable; HR is the heart rate, beats/min; * statistically significant differences compared to the initial data, $p < 0.05$.

ступления избыточного кислорода в организм, при этом уровень их адаптационных резервов и работоспособности сердечно-сосудистой системы снижается. У лиц с низкой устойчивостью отмечается снижение уровня функциональных возможностей ЦНС, проявляющееся увеличением латентного времени простой зрительно-моторной реакции и снижением интенсивности и устойчивости внимания. Уровень

выявленных сдвигов после дыхания гипербарическим кислородом сохраняется не менее суток после окончания спуска.

При исследовании степени устойчивости водолазов к токсическому действию кислорода предпочтительно проведение пробы с возрастающей дозированной физической нагрузкой с целью оценки уровня адаптационных резервов и работоспособности сердечно-сосудистой системы.

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;

Исрафилов Загир Маллараджабович — подполковник 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, улица Академика Лебедева, д. 6; e-mail: warag05@mail.ru; SPIN 1619-6621; ORCID 0000-0002-3524-7412;

Мясников Алексей Анатольевич — доктор медицинских наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, 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; 194044, Санкт-Петербург, улица Академика Лебедева, д. 6; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru; SPIN 2590-0429, ORCID 0000-0002-7427-0885;

Чернов Василий Иванович — кандидат медицинских наук доцент, полковник медицинской службы в отставке, 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; 194044, Санкт-Петербург, улица Академика Лебедева, д. 6; e-mail: chernov_61@mail.ru; SPIN 4767-4001; ORCID 0000-0002-8494-1929;

Шитов Арсений Юрьевич — кандидат медицинских наук, заслуженный изобретатель Российской Федерации, 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, улица Академика Лебедева, д. 6; e-mail: arseniyshitov@mail.ru; SPIN 7390-1240; ORCID 0000-0002-5716-0932.

Information about the authors:

Dmitry P. Zverev — Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, Colonel of the Medical Service, Head of the Department (Physiology of Scuba Diving) of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Military Medical Academy named after S. M. Kirov» Ministry of Defense of Russia; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; e-mail: z.d.p@mail.ru; SPIN 7570-9568; ORCID 0000-0003-3333-6769;

Israfilov Zagir Mallarajabovich — Lieutenant Colonel of the Medical Service, Adjunct of the Department (Physiology of Scuba Diving) of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Military Medical Academy named after S. M. Kirov» Ministry of Defense of Russia; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; e-mail: warag05@mail.ru; SPIN 1619-6621; ORCID 0000-0002-3524-7412;

Alexey A. Myasnikov — Dr. of Sci. (Med.), Professor, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Colonel of the Reserve Medical Service, Professor of the Department (Physiology of Scuba Diving) of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Military Medical Academy named after S. M. Kirov» Ministry of Defense of Russia; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru; SPIN 2590-0429; ORCID 0000-0002-7427-0885;

Vasily I. Chernov — Cand. of Sci. (Med.), Associate Professor, retired Colonel of the Medical Service, Associate Professor of the Department (Physiology of Scuba Diving) of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Military Medical Academy named after S. M. Kirov» Ministry of Defense of Russia; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; e-mail: chernov_61@mail.ru; SPIN 4767-4001; ORCID 0000-0002-8494-1929;

Arseniy Yu. Shitov — Cand. of Sci. (Med.), Honored Inventor of the Russian Federation, Senior lecturer of the Department (Physiology of Scuba Diving) of the Federal State Budgetary Military Educational Institution of Higher Education «Military Medical Academy named after S. M. Kirov» Ministry of Defense of Russia; 194044, St. Petersburg, Academician Lebedev Street 6; e-mail: arseniyshitov@mail.ru; SPIN 7390–1240; ORCID 0000–0002–5716–0932.

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 — *Д. П. Зверев, З. М. Исрафилов, А. А. Мясников*. Вклад в сбор и математический анализ данных — *Д. П. Зверев, З. М. Исрафилов, В. И. Чернов*. Вклад в подготовку рукописи — *З. М. Исрафилов, А. А. Мясников, А. Ю. Шитов*.

Author contribution. All authors equally participated in the preparation of the article in accordance with the ICMJE criteria. All authors met the ICMJE authorship criteria. Special contribution: *DPZ, ZMI, AAM* aided in the concept and plan of the study; *DPZ, ZMI, VICH* provided collection and mathematical analysis of data.

Соответствие принципам этики. Исследования были организованы и проведены в соответствии с положениями и принципами действующих международных и российских законодательных актов, в частности Хельсинкской декларации 1975 г. и ее пересмотра 2013 г. Легитимность исследований подтверждена заключением независимого этического комитета при Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова (протокол № 249 от 27.04.2021).

Adherence to ethical standards. The research was organized and conducted in accordance with the provisions and principles of the current international and Russian legislative acts, in particular the Helsinki Declaration of 1975 and its revision in 2013. The legitimacy of the research was confirmed by the conclusion of the Independent Ethics Committee at the Military Medical Academy named after S. M. Kirov (Protocol No. 249 of 27.04.2021).

Потенциальный конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Поступила/Received: 15.04.2022

Принята к печати/Accepted: 22.05.2022

Опубликована/Published: 30.09.2022

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Boussuges A. Echocardiography in military oxygen divers // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2007. Vol. 78, No. 5. P. 500–504. PMID: 17539444.
2. Gole Y. Arterial compliance in divers exposed to repeated hyperoxia using rebreather equipment // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2009. Vol. 80, No. 5. P. 482–484. doi: 10.3357/asm.2457.2009.
3. Nuckols M.L. Oxygen levels in closed circuit UBAs during descent // *Life Support & Biosphere Science*. 1996. Vol. 2, No. 3–4. P. 117–124. PMID: 11538560.
4. Åsmul K. Diving and long-term cardiovascular health // *Occupational medicine (Oxford, England)*. 2017. Vol. 67, No. 5. P. 371–376. doi: 10.1093/occmed/kqx049.
5. Jammes Y. Hyperbaric hyperoxia induces a neuromuscular hyperexcitability: assessment of a reduced response in elite oxygen divers // *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2003. Vol. 23, No. 3. P. 149–154. doi: 10.1046/j.1475-097x.2003.00486.x.
6. Гананольский В.П. Использование математического моделирования для прогноза безболевого течения декомпрессионной болезни у спортивных дайверов // *Известия Российской военно-медицинской академии*. 2020. Т. 39, № S3–1. С. 19–21. ISSN: 2713–2315. Ganapol'skij V.P. Ispol'zovanie matematicheskogo modelirovaniya dlja prognoza bezbolevogo techeniya dekompressionnoy bolezni u sportivnyh dajverov // *Izvestija Rossijskoj voenno-meditsinskoj akademii*. 2020. T. 39, No. S3–1. S. 19–21. ISSN: 2713–2315. [Ganapolsky V.P. Using mathematical modeling to predict the painless course of decompression sickness in divers' tissue. *Proceedings of the Russian Military Medical Academy*, 2020, Vol. 39, No. S3–1, pp. 19–21 (In Russ.)]. ISSN: 2713–2315.
7. Щеголев В.А., Попов С.В. Несчастные случаи, возникающие с водолазами в связи с особенностями водной среды и несоблюдением мер безопасности // *Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях*. 2013. № 2. С. 27–31. Shhegolev V.A., Popov S.V. Neschastnyye sluchai, vznikajushhie s vodolazami v svjazi s osobennostjami vodnoj sredy i nesobljudeniem mer bezopasnosti // *Mediko-biologicheskie i social'no-psihologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychajnyh situacijah*. 2013. No. 2. S. 27–31. [Sh-

- chogolev V.A., Popov S.V. Accidents that occur with divers due to the nature of water environment and failure to comply with safety measures. *Medical-biological and social-psychological problems of safety in emergencies*, 2013, No. 2, pp. 27–31 (In Russ.]. ISSN: 2541–7487.
8. Мясников А.А., Ефищенко Е.В., Зверев Д.П., Кленков И.Р. Хроническая декомпрессионная болезнь и ее диагностика // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2018. № 4 (64). С. 26–31. Mjasnikov A.A., Eficenko E.V., Zverev D.P., Klenkov I.R. Hronicheskaja dekompressionnaja bolezn' i ee diagnostika // *Vestnik Rossijskoj voenno-meditsinskoj akademii*. 2018. No. 4 (64). S. 26–31. [Myasnikov A.A., Eficenko E.V., Zverev D.P., Klenkov I.R. Chronic decompression sickness and its diagnosis. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*, 2018, No. 4 (64), pp. 26–31 (In Russ.]. ISSN: 1682–7392.
 9. Wingelaar T.T., van Ooij P.-J.A.M., van Hulst R.A. Oxygen Toxicity and Special Operations Forces Diving: Hidden and Dangerous // *Front Psychol*. 2017. Vol. 8. P. 1–9. doi: 0.3389/fpsyg.2017.01263.
 10. Di Piero V. Cerebral effects of hyperbaric oxygen breathing: a CBF SPECT study on professional divers // *European Journal of Neurology*. 2002. Vol. 9, No. 4. P. 419–421. doi: 10.1046/j.1468-1331.2002.00436.x.
 11. Ooij P.-J.A.M., van, Sterk P.J., van Hulst R.A. Oxygen, the lung and the diver: friends and foes? // *Eur. Respir. Rev*. 2016. Vol. 25, No. 142. P. 496–505. doi: 10.1183/16000617.0049-2016.
 12. Вагин Ю.Е., Деунежева С.М., Хлытина А.А. Вегетативный индекс Кердо: роль исходных параметров, области и ограничения применения // *Физиология человека*. 2021. Т. 47, № 1. С. 31–42. Vagin Yu.E., Deunezheva S.M., Khlytina A.A. Vegetativnyy indeks Kerdo: rol' iskhodnykh parametrov, oblasti i ogranicheniya primeneniya // *Fiziologiya cheloveka*. 2021. T. 47, No. 1. S. 31–42. [Vagin Yu.E., Deunezheva S.M., Khlytina A.A. The vegetative index of Kerdo: the role of initial parameters, areas and limitations of application. *Human Physiology*. 2021. Vol. 47, No. 1, pp. 31–42 (In Russ.]. doi: 10.31857/S0131164620060120.
 13. Самойлов А.С., Никонов Р.В., Пустовойт В.И., Ключников М.С. Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода // *Спортивная медицина: наука и практика*. 2020. Т. 10, № 3. С. 73–80. Samoylov A.S., Nikonov R.V., Pustovoyt V.I., Klyuchnikov M.S. Primenenie metodiki analiza variabel'nosti serdechnogo ritma dlya opredeleniya individual'noy ustoychivosti k toksicheskomu deystviyu kisloroda // *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika*. 2020. T. 10, No. 3. S. 73–80. [Samoilov A.S., Nikonov R.V., Pustovoyt V.I., Klyuchnikov M.S. Application of the method of analysis of heart rate variability to determine individual resistance to the toxic effect of oxygen. *Sports medicine: science and practice*, 2020, Vol. 10, No. 3, pp. 73–80 (In Russ.]. doi: 10.47529/2223–2524.2020.3.73.
 14. Tocco F. Cardiovascular adjustments in breath-hold diving: comparison between divers and non-divers in simulated dynamic апноеа // *European Journal of Applied Physiology*. 2012. Vol. 112, No. 2, pp. 543–554. doi: 10.1007/s00421-011-2006-0.
 15. Мальцев, Д.Н. Диагностическое значение пробы Руфье // *Здоровье человека, теория и методика физической культуры и спорта*. 2019. № 5 (16). С. 113–120. Mal'tsev D.N. Diagnosticheskoe znachenie proby Ruf'e // *Zdorov'e cheloveka, teoriya i metodika fizicheskoy kul'tury i sporta*. 2019. No. 5 (16). S. 113–120. [Maltsev D.N. Diagnostic value of the Ruffier test. *Human health, theory and methodology of physical culture and sports*, 2019. No. 5 (16), pp. 113–120 (In Russ.]. ISSN. 2414–0244.
 16. Гржибовский А.М., Унгурияну Т.Н., Горбатова М.А. Описательная статистика с использованием пакетов статистических программ SPSS и Stata // *Наркология*. 2017. Т. 16, № 4 (184). С. 36–51. Grzhibovskiy A.M., Unguryanu T.N., Gorbatoва M.A. Opisatel'naya statistika s ispol'zovaniem paketov statisticheskikh programm SPSS i Stata // *Narkologiya*. 2017. T. 16, No. 4 (184). S. 36–51. [Grzhibovsky A.M., Unguryanu T.N., Gorbatoва M.A. Descriptive statistics using statistical software packages SPSS and Stata. *Narcology*, 2017, Vol. 16, No. 4 (184), pp. 36–51 (In Russ.]. ISSN: 1682–8313.
 17. Ooij P.-J.A.M., van. Lung function before and after oxygen diving: a randomized crossover study // *Undersea and Hyperbaric Medicine*. 2012. Vol. 39, No. 3. P. 699–707. PMID: 22670550.
 18. Hirayanagi K., Nakabayashi K., Okonogi K., Ohiwa H. Autonomic nervous activity and stress hormones induced by hyperbaric saturation diving // *Undersea and Hyperbaric Medicine*, 2003, No. 30 (1), pp. 47–55. PMID: 12841608.
 19. Ciarlone G.E., Hinojo C.M., Stavitzski N.M., Dean J.B. CNS function and dysfunction during exposure to hyperbaric oxygen in operational and clinical settings // *Redox Biology*. 2019. Vol. 27. P. 101–159. doi: 10.1016/j.redox.2019.101159.