

<https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.3.73>

УДК 61.612.274:612.172.2

Тип статьи: Оригинальное исследование / Original article



## Применение методики анализа вариабельности сердечного ритма для определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода

*А.С. Самойлов, Р.В. Никонов\*, В.И. Пустовойт, М.С. Ключников*

*ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации –  
Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна  
Федерального медико-биологического агентства России», Москва, Россия*

### РЕЗЮМЕ

**Цель исследования:** оценка устойчивости организма спортсменов-дайверов к токсическому действию кислорода по показателям вариабельности сердечного ритма (ВСР). **Материалы и методы.** Обследованы 38 здоровых спортсменов-дайверов в возрасте от 23 до 32 лет. Перед сеансом гипербарической оксигенации (ГБО) обследуемому производили измерение артериального давления и пульса методом осциллометрии сидя в покое, после чего производили пятиминутную запись ВСР в покое, положении сидя. После этого двух обследуемых совместно с медицинским работником размещали сидя в барокамере, в которой создавалось абсолютное давление 0,25 МПа. Обследуемых включали на дыхание 100 % медицинским кислородом, каждые 15 минут измеряли пульс и артериальное давление и вычисляли минутный объем кровотока (МОК) по формуле Старра. При появлении тенденции на увеличение МОК, а также по истечении 75 минут дыхания кислородом испытуемых выводили из барокамеры. Непосредственно после выхода из барокамеры проводили запись ВСР испытуемых. По результатам измерения параметров гемодинамики испытуемые были разделены на 3 группы. Первая группа — неустойчивые, МОК которых стал увеличиваться в первые 45 минут ГБО, во вторую группу вошли те, МОК которых начал увеличение с 46 по 75 минут, к третьей группе отнесли испытуемых, МОК которых не увеличивался. **Результаты.** Анализ ВСР показал наиболее значимое достоверное увеличение ( $p < 0,001$ ) мощности спектра VLF ( $\text{мс}^2$ ) и относительной мощности VLF %, а также Alpha 2 после ГБО у обследуемых первой группы (неустойчивых) по сравнению с исходными параметрами и другими группами, что отражает активацию симпатического отдела вегетативной нервной системы и надсегментарных структур мозга. Характер изменений показателей временного домена ВСР (снижение SNS index, pNN50 (%), PNS index) подтверждает наличие выраженной симпатикотонии в первой группе. **Выводы.** Определены с высокой достоверностью ( $p < 0,001$ ) три наиболее значимых основных признака (VLF ( $\text{мс}^2$ ), VLF % и Alpha 2), которые обладают умеренной отрицательной корреляционной связью ( $-0,70 < r < -0,30$ ) с уровнем устойчивости спортсменов-дайверов к токсическому действию кислорода. Наблюдения за спортсменами с высокой устойчивостью показали, что для них характерны изменения гемодинамики по ваготоническому типу, тогда как для неустойчивых был характерен симпатикотонический тип регуляции. Анализ результатов продемонстрировал умеренную корреляционную связь ВСР с признаками токсического действия кислорода на организм дайверов. Анализ ВСР рекомендуется для достоверной ( $p < 0,05$ ) диагностики индивидуальной устойчивости.

**Ключевые слова:** спортсмены, дайверы, водолазы, токсическое действие кислорода, вариабельность сердечного ритма (ВСР), VLF

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** 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;10(3):73–80. <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.3.73>

Поступила в редакцию: 23.05.2020

Принята к публикации: 31.08.2020

Опубликована: 25.11.2020

\* Автор, ответственный за переписку

## Using heart rate variability to determine individual resistance to the hyperbaric oxygen toxicity

*Alexander S. Samoilov, Roman V. Nikonov\*, Vasily I. Pustovoit, Mikhail S. Kluchnikov*

*State Research Center — A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of  
Federal Medical Biological Agency of Russia, Moscow, Russia*

## ABSTRACT

**Objective:** assessment of the resistance of the body of athletes-divers to the hyperbaric oxygen toxicity on indicators of the heart rate variability (HRV). **Materials and methods.** The study involved 38 healthy athletes-divers aged 23 to 32 years. Before the session of hyperbaric oxygenation (HBO), the test subject was measured the blood pressure and pulse by the method of oscillometry while he was sitting at rest, after which a five-minute recording of HRV in sitting position at rest was made. After that, the two test subjects were placed together, sitting with a physician in a pressure (decompression) chamber, where an absolute pressure of 0.25 MPa was created. The test subjects were given 100 % medical oxygen to breathe, their pulse and blood pressure were measured every 15 minutes, and their cardiac output (CO) was calculated by the Starr formula. When there was an increasing tendency of the CO, and also after 75 minutes of oxygen breathing, the test subjects were taken out of the pressure chamber. Immediately after leaving the pressure chamber, the HRV of the test subjects was recorded. According to the results of measurement of hemodynamic parameters, the test subjects were divided into 3 groups. The first group — unstable, whose CO began to increase in the first 45 minutes of HBO, the second group included those whose CO began to increase from 46 to 75 minutes, the third group included test subjects whose CO did not increase. **Results.** HRV analysis showed the most significant reliable ( $p < 0.001$ ) VLF spectrum power ( $\text{ms}^2$ ) and relative VLF power (%), as well as Alpha 2 after HBO in the first group of test subjects (unstable) compared to the initial parameters and other groups, which reflects the activation of the sympathetic nervous system and suprasegmental structures of the brain. The essence of changes in the HRV time domain indicators (decrease in SNS index, pNN50 (%), PNS index) confirms the presence of pronounced sympathicotonia in the first group. **Conclusions:** the three most significant metrics (VLF ( $\text{ms}^2$ ), VLF (%) and Alpha 2) were determined with high confidence ( $p < 0.001$ ), which have a moderate negative correlation ( $-0.70 < r < -0.30$ ) with the level of divers' resistance to the to the hyperbaric oxygen toxicity. Observations of athletes with high stability showed that they were characterized by changes in hemodynamics of the vagotonic type, while unstable ones were characterized by the sympathicotonic type of regulation. Evaluation of the results showed amoderate correlation between HRV and symptom of oxygen toxicity on divers and is recommended for a reliable ( $p < 0.05$ ) diagnosis.

**Keywords:** athletes, divers, hyperbaric oxygen toxicity, heart rate variability (HRV), VLF

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Samoilov A.S., Nikonov R.V., Pustovoi V.I., Kljuchnikov M.S. Using heart rate variability to determine individual resistance to the hyperbaric oxygen toxicity. *Sportivnaya meditsina: nauka i praktika (Sports medicine: research and practice)*. 2020;10(3):73–80 (In Russ.). <https://doi.org/10.47529/2223-2524.2020.3.73>

**Received:** 23 May 2020

**Accepted:** 31 August 2020

**Published:** 25 November 2020

\* Corresponding author

## 1. Введение

Спортивный дайвинг приобретает все большую популярность в мире. Активно развиваются Всемирная подводная федерация и Федерация подводного спорта России. Растет количество подводных соревнований с использованием кислорода, который под повышенным давлением неблагоприятно действует на организм спортсменов-дайверов. В связи с этим возрастает актуальность определения индивидуальной устойчивости дайверов к токсическому действию кислорода, что может существенно облегчить распределение спортсменов по профилю спортивной деятельности, повысить эффективность планирования и проведения тренировочного процесса и дать возможность создания шкалы устойчивости организма дайверов к гипероксии.

На данный момент предложена методика определения индивидуальной устойчивости к токсическому действию кислорода, разработанная в Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова [1]. Она основана на оценке некоторых параметров сердечно-сосудистой системы (систолическое артериальное давление, пульсовое давление, частота сердечных сокращений, ударный объем и минутный объем кровообращения [2]) во время гипербарической оксигенации (ГБО) в барокамере при абсолютном давлении газовой среды 0,25 МПа. В основе этой методики лежит спазм периферических сосудов, который объясняется активацией парасимпатического отдела вегетативной нервной системы, экономизацией деятельности сердечно-сосудистой

системы под воздействием повышенного парциального давления кислорода [3, 4]. В 2003 году были получены данные, подтверждающие снижение тонуса симпатического отдела вегетативной нервной системы в условиях повышенного парциального давления кислорода, что было связано с особенностями организма обследуемых, направленными прежде всего на защиту от токсических внешних факторов [4–6]. Эта реакция организма расценивается как компенсаторная, но при длительном воздействии повышенного парциального давления кислорода возникает гипероксическая гипоксия, что приводит к развитию стрессовой реакции, характеризующейся увеличением частоты сердечных сокращений, увеличением ударного объема, пульсового давления, минутного объема кровообращения и, как следствие, расширением периферических сосудов с изменением тонуса вегетативной нервной системы [1, 4, 6].

Недостатком описанной методики является невысокая точность и субъективность измерений артериального давления и пульса, а увеличение минутного объема кровообращения на 1–2 % от начального значения зачастую не отражает общей тенденции и объясняется погрешностью измерений или влиянием эмоционального, термического факторов, но тем не менее формально служит основанием для остановки исследования и формирования неверных выводов.

Для увеличения достоверности и объективности определения устойчивости организма дайверов к токсическому действию кислорода необходимо определить

критерии, отражающие механизмы регуляции сердечно-сосудистой системы в ответ на развитие гипероксической гипоксии при помощи анализа методом вариабельности сердечного ритма (ВСР).

**Цель исследования:** оценка устойчивости организма спортсменов-дайверов к токсическому действию кислорода по показателям ВСР.

**Задачи исследования:** 1. Определить индивидуальную устойчивость дайверов к токсическому действию кислорода. 2. Выявить предикторы, значимо влияющие на распределение спортсменов по группам с различной устойчивостью к токсическому действию кислорода. 3. Проанализировать зависимость между изменениями активности вегетативной регуляции и тонусом сердечно-сосудистой системы в ответ на повышенное парциальное давление кислорода. 4. Определить взаимосвязь основных показателей ВСР с устойчивостью организма дайверов к гипоксической гипоксии.

## 2. Материалы и методы исследования

Нами обследованы 38 здоровых спортсменов-дайверов, мужчин, в возрасте от 23 до 32 лет, средний возраст —  $24,4 \pm 7,6$  года. Исследование проводили между 10.00 и 14.00.

Непосредственно перед сеансом ГБО в отдельном помещении с температурой воздуха 20–22 °С обследуемому производили измерение артериального давления (АД) и пульса методом осциллометрии сидя в покое (после 1–3 минут отдыха и стабилизации пульса) при помощи автоматического тонометра A&D UA-1100 (A&D Company Ltd., Токуо, Japan), после чего производили пятиминутную запись ВСР в покое, положении сидя в соответствии с требованиями стандартов Европейского кардиологического общества и Северо-Американского общества стимуляции и электрофизиологии [7]. Сразу после получения входных данных двух обследуемых совместно с медицинским работником размещали сидя в трехместной водолазной барокамере, в которой создавалось абсолютное давление 0,25 МПа. Обследуемых переводили на дыхание 100 % медицинским кислородом через кислородные маски, подключенные к изолированному кислородному контуру (выдох производился в окружающую среду). Медицинский работник каждые 15 минут производил измерения АД и пульса испытуемых, оценивал субъективные и объективные признаки токсического действия кислорода. Немедленно производился расчет минутного объема кровообращения (МОК). В случае появления жалоб на состояние здоровья, появления признаков на увеличение МОК, а также по истечении 75 минут дыхания кислородом испытуемых выводили из барокамеры, после чего проводили обследование методом ВСР испытуемых. По результатам измерения параметров гемодинамики испытуемые были разделены на 3 группы, где неустойчивые к токсическому действию кислорода вошли в первую группу (6 человек) — для этих спортсменов было характерно

увеличение МОК в первые сорок пять минут ГБО (один из них выражал жалобы на дискомфорт в груди). Дайверы с увеличением МОК с 46-й по 75-ю минуту вошли во вторую группу (13 человек), а спортсмены, у которых увеличение МОК в течение всего обследования не регистрировалось, были отнесены в третью группу (19 человек).

Запись производилась датчиком сердечного ритма Polar H10 (Polar Electro Oy, Finland) со смартфоном на базе операционной системы Android OS и приложения Elite HRV 4.5.1 для Android OS (Elite HRV LLC).

Анализ результатов проводили на ПЭВМ с применением программного обеспечения Kubios HRV Standard 3.2.0 (Kubios Oy, Finland), с максимальной степенью коррекции артефактов (Very strong) [8] и применением математической модели быстрого преобразования Фурье для расчета показателей частотного домена ВСР.

Вычисляли показатели временной области ВСР: парасимпатический индекс (PNS index); симпатический индекс (SNS index); среднюю длину интервала RR (Mean RR (мс)); среднюю частоту сердечных сокращений (Mean HR (удар/мин)); корень квадратный из индекса напряжения регуляторных систем по Баевскому Р.М. (Stress index) [9]; стандартное отклонение междарных интервалов (STD RR (мс)); стандартное отклонение частоты сердечных сокращений (STD HR (удар/минута)); минимальную и максимальную частоту сердечных сокращений (HR min, HR max (удар/минута)); среднеквадратичное значение различия последовательных интервалов RR (RMSSD (мс)); количество последовательных интервалов RR, которые отличаются более чем на 50 мс (NN50); процент последовательных интервалов RR, которые отличаются более чем на 50 мс (pNN50 (%)); треугольный индекс ВСР — целое от деления плотности интервальной гистограммы RR на свою высоту (RR triangular index)); базовую ширину (ширину основания) гистограммы интервала RR (TINN (мс)) [8].

В частотной области определяли пиковую частоту очень низкочастотного диапазона (VLF (Гц)); пиковую частоту низкочастотного диапазона (LF (Гц)); пиковую частоту высокочастотного диапазона (HF (Гц)); абсолютную мощность очень низкочастотного (0–0,04 Гц) диапазона (VLF (мс<sup>2</sup>)); абсолютную мощность низкочастотного (0,04–0,15 Гц) диапазона (LF (мс<sup>2</sup>)); абсолютную мощность высокочастотного (0,15–0,4 Гц) диапазона (HF (мс<sup>2</sup>)); логарифм мощности очень низкочастотного диапазона (VLF (log)); логарифм мощности низкочастотного диапазона (LF (log)); логарифм мощности высокочастотного диапазона (HF (log)); относительную мощность очень низкочастотного (0–0,04 Гц) диапазона (VLF (%)); относительную мощность низкочастотного (0,04–0,15 Гц) диапазона (LF (%)); относительную мощность высокочастотного (0,15–0,4 Гц) диапазона (HF (%)); относительную мощность низкочастотного (0,04–0,15 Гц) диапазона в нормальных единицах измерения (LF (н.у.)); относительную мощность высокочастотного

(0,15–0,4 Гц) диапазона в нормальных единицах измерения (HF (n.u.)); общую мощность спектра ВСР (Total power (мс<sup>2</sup>)); отношение мощности низкочастотного диапазона к мощности высокочастотного диапазона (LF/HF ratio) [8].

Из нелинейных показателей определяли стандартное отклонение перпендикулярной линии идентичности на графике Пуанкаре (SD1 (мс)); стандартное отклонение вдоль линии идентичности на графике Пуанкаре (SD2 (мс)); отношение SD2 к SD1 (SD2/SD1 ratio); приближенную энтропию, которая отражает регулярность и сложность временных рядов междарных интервалов (approximate entropy (ApEn)); выборочную энтропию, которая измеряет регулярность и сложность временных рядов междарных интервалов выборки (sample entropy (SampEn)); бестрендовый анализ колебаний, описывающий краткосрочные колебания (alpha 1); бестрендовый анализ колебаний, описывающий долгосрочные колебания (alpha 2) [8].

Статистическая обработка данных и графическое представление выполнены при помощи табличного редактора Excel 2016 в программе Statistica 7 for Windows

(StatSoft.Inc., Tulsa, USA), применялся многофакторный дисперсионный анализ ANOVA (one-way ANOVA) с оценкой значимости различий по LSD-критерию Фишера. Определялись различия в показателях ВСР до и после воздействия ГБО внутри групп и межгрупповые. Оценку корреляционной связи проводили с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена, так как число наблюдений было небольшим и определяемый признак носил ранговый характер, для оценки значимости коэффициента корреляции применяли *t*-критерий Стьюдента.

**3. Результаты**

Результаты анализа ВСР представлены в таблице 1.

Остальные показатели ВСР не продемонстрировали статистически значимых различий. Многофакторный дисперсионный анализ результатов ВСР после ГБО показал значимые (*p* < 0,001) изменения по сравнению с исходными параметрами и другими группами спортсменов-дайверов, в первой группе (неустойчивых), для которых были характерны: повышение средней абсолютной мощности спектра VLF (мс<sup>2</sup>) (рис. 1) и относительной мощности VLF % (рис. 2).

Таблица 1

**Средние значения показателей ВСР спортсменов-водолазов до и после воздействия гипербарического кислорода в зависимости от устойчивости к токсическому действию кислорода**

Table 1

**Average values of HRV indicators of athletes-divers before and after exposure to hyperbaric oxygen, depending on the stability to hyperbaric oxygen toxicity**

Состояние / Condition Показатель / Parameter	Группа I		Группа II		Группа III	
	до ГБО / before HBO	после ГБО / after HBO	до ГБО / before HBO	после ГБО / after HBO	до ГБО / before HBO	после ГБО / after HBO
VLF (мс <sup>2</sup> /ms <sup>2</sup> )	38,91 ± 24,00	390,17 ± 24,00**	55,13 ± 16,30	56,44 ± 16,30	72,06 ± 13,48	65,85 ± 13,48
VLF %	3,96 ± 0,64	29,21 ± 6,46**	8,26 ± 1,45	6,53 ± 1,21	7,40 ± 1,30	6,39 ± 0,66
HF log	5,22 ± 0,28	4,34 ± 0,57*	5,25 ± 0,19	5,33 ± 0,14	5,23 ± 0,15	5,24 ± 0,20
HF (n.u.)	26,73 ± 6,57	12,84 ± 5,38*	34,92 ± 4,63	33,06 ± 3,98	31,11 ± 4,41	33,11 ± 4,69
LF (n.u.)	73,17 ± 6,54	87,13 ± 5,38*	65,04 ± 4,63	66,90 ± 3,99	68,85 ± 4,42	66,85 ± 4,69
SNS index	0,82 ± 0,29	0,004 ± 0,354	1,38 ± 0,26	0,27 ± 0,16	0,39 ± 0,19	-0,169 ± 0,14*
PNS index	-0,82 ± 0,16	-0,19 ± 0,31	-0,94 ± 0,19	-0,02 ± 0,14*	-0,30 ± 0,15	0,31 ± 0,10*
pNN50 (%)	4,74 ± 1,04	4,18 ± 4,18	3,13 ± 0,76	6,62 ± 1,16*	5,86 ± 0,83	8,94 ± 0,99*
Mean HR	70,56 ± 2,41	60,47 ± 4,18*	72,25 ± 2,72	59,72 ± 1,57*	63,90 ± 2,01	56,57 ± 1,08*
Mean RR	855,47 ± 30,54	1017,02 ± 72,32*	846,93 ± 37,17	1013,45 ± 28,44*	955,04 ± 28,90	1067,60 ± 20,62*
SD1	17,35 ± 0,76	16,21 ± 1,47	15,00 ± 0,81	18,09 ± 1,03*	18,30 ± 0,74	20,40 ± 0,92*
SD2	45,80 ± 6,24	49,20 ± 2,37*	35,95 ± 1,73	35,56 ± 1,88	39,66 ± 1,81	39,49 ± 2,50
Alpha 1	1,26 ± 0,10	1,36 ± 0,07	1,23 ± 0,05	1,12 ± 0,06*	1,14 ± 0,05	1,08 ± 0,06*
Alpha 2	0,28 ± 0,03	0,47 ± 0,03**	0,35 ± 0,02	0,29 ± 0,02	0,28 ± 0,01	0,25 ± 0,01
SampEn	1,31 ± 0,18	1,05 ± 0,16*	1,39 ± 0,09	1,50 ± 0,12	1,53 ± 0,07	1,52 ± 0,08

Примечание: \* — значимость *p* < 0,05; \*\* — значимость *p* < 0,001.

Note: \* — significance *p* < 0.05; \*\* — significance *p* < 0.001.

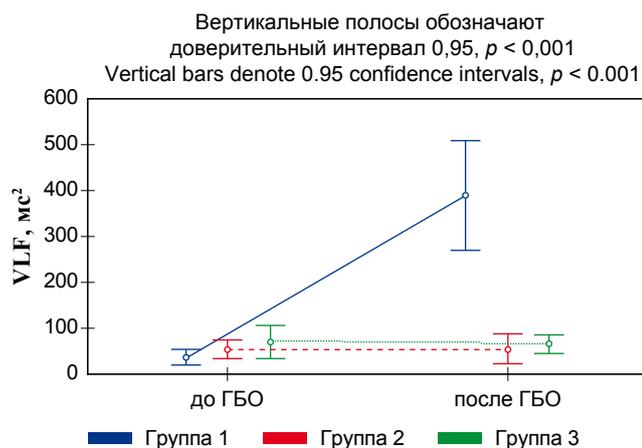


Рис. 1. Значимость внутригрупповых и межгрупповых различий значений VLF ( $ms^2$ ). По оси Y — групповые значения до ГБО (1) и после ГБО (3), по оси X — мощность спектра VLF ( $ms^2$ )

Fig. 1. Significance levels of intra-group and inter-group differences in VLF ( $ms^2$ ). Y-axis — group values before HBO (1) and after HBO (3), X-axis — VLF spectrum power ( $ms^2$ )

С целью изучения связи значений показателей BCP и устойчивостью к токсическому действию кислорода была установлена умеренная корреляция ( $p < 0,05$ ;  $-0,70 < r < -0,30$ ) между значениями VLF ( $ms^2$ ), VLF % и устойчивостью к токсическому действию кислорода.

Выходные средние значения мощности LF ( $ms^2$ ) были выше у представителей первой группы, а HF log, HF n.u. ниже, нежели в других группах, при этом различия значений показателей во второй и третьей группах незначимы.

SNS index показал общий тренд на снижение, а PNS index — на увеличение во всех группах, при этом во второй и третьей группе различия показателя до и после воздействия ГБО были значимы (табл. 1).

Значения показателя рNN50 (%) после воздействия ГБО снижались, но только во второй и третьей группе значимо, по сравнению с исходными данными, также значимо различаются выходные результаты первой и третьей групп.

Средняя частота сердечных сокращений Mean HR под воздействием гипербарического кислорода достоверно снижалась, а среднее значение междударного интервала Mean RR достоверно увеличивалось внутри всех групп, межгрупповые различия незначимы (табл. 1).

Показатели нелинейного анализа SD1, Alpha1 после ГБО значимо не изменились в первой группе, но SD1 увеличился и Alpha 1 снизился во второй и третьей. Значения показателей SD2, Alpha 2 достоверно выросли в первой группе и не изменились во второй и третьей группах. Наиболее значимые различия выходных параметров демонстрирует SampEn — снижение на 20 % в первой при незначимой динамике в других группах (табл. 1). Все выходные показатели первой группы значимо отличались от показателей второй и третьей групп.

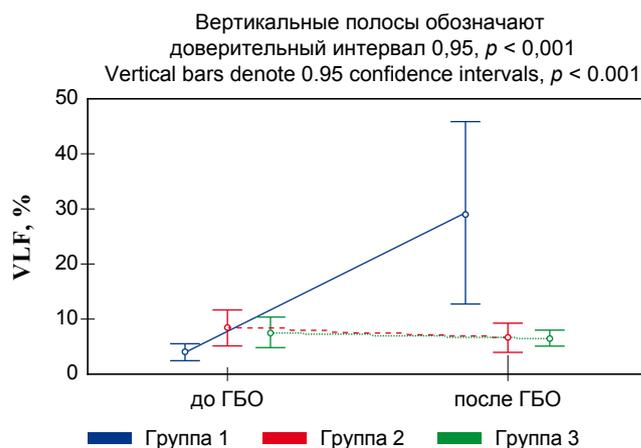


Рис. 2. Значимость внутригрупповых и межгрупповых различий значений VLF %. По оси Y — групповые значения до ГБО (1) и после ГБО (3), по оси X — относительная мощность спектра VLF %

Fig. 2. Significance levels of intra-group and inter-group differences in VLF % values. Y-axis — group values before HBO (1) and after HBO (3), X-axis — VLF % spectrum power

#### 4. Обсуждение результатов

В настоящее время считается, что мощность диапазона VLF обусловлена работой гуморальных механизмов регуляции [10] и отражает энергодефицитные состояния [9, 11], что характерно для гипероксической гипоксии. Свой вклад в мощность VLF делают парасимпатическая и симпатическая нервная системы (психоэмоциональное напряжение, физическая активность) [10]. Доминирование VLF диапазона в общем спектре свидетельствует о нарушении механизмов барорецепторной регуляции, которое проявляется в лабильности артериального давления, что, вероятно, отражает изменение тонуса сосудов при декомпенсации гипероксической гипоксии [12]. Кроме того, есть основания полагать, что диапазон VLF генерируется активностью надсегментарных эрготропных структур [9, 11, 12], которые рассматриваются в качестве триггерных зон — источников тонико-клонических приступов при гипероксии [4], и демонстрирует функциональное состояние головного мозга при органической или психогенной патологии [11, 12]. Повышение абсолютной мощности VLF было описано в межиктальном [13], иктальном [14] и постиктальном [15] периоде у больных эпилепсией, а также у людей, страдающих пароксизмальными вегетативными расстройствами, непосредственно перед приступом и во время него [12]. Помимо этого, метод анализа вариабельности сердечного ритма применяется для предсказания и профилактики эпилептических приступов [16, 17]. Необходимо отметить характерное состояние вегетативного баланса испытуемых первой группы, отражающееся в изменении соотношений мощностей в различных диапазонах спектра:  $VLF > LF > HF$ , в отличие от нормального ( $LF > HF > VLF$ ), трактуемое как симпатикотония с вовлечением надсегментарных структур [12, 13].

Увеличение мощности LF ( $\text{m}^2$ ) и снижение HF log, HF p.u. после ГБО у испытуемых первой группы по сравнению с другими группами указывает на повышение тонуса симпатической нервной системы, в отличие от представителей третьей и второй групп [10].

Учитывая данные авторов, есть основание предположить, что повышение абсолютной и относительной мощности VLF, изменение соотношений компонентов спектральной мощности является показателем активации зон головного мозга, ответственных за генез судорожного приступа вследствие гипербарической кислородной интоксикации и доминирования симпатических и надсегментарных регуляторных влияний в ответ на развитие гипероксической гипоксии.

Результаты нелинейного анализа, коррелирующие с частотными показателями [10], демонстрируют сходные с выявленными выше закономерностями. Выходные значения SD1 наиболее различаются в первой и третьей группах, что также характерно для LF ( $\text{m}^2$ ). Показатель Alpha 2 после ГБО в первой группе значимо различается с аналогичным в других группах, подобно VLF ( $\text{m}^2$ ), VLF % и обусловлен, вероятно, изменением тонуса сосудов вследствие эфферентных симпатических влияний.

Характер изменений показателей временного домена BCP (снижение SNS index, pNN50 (%), PNS index) подтверждает наличие выраженной симпатикотонии в первой группе. Уменьшение pNN50 (%), Mean HR и увеличение Mean RR, по мнению авторов, произошло в результате хроноконцентрационного действия гипербарического кислорода, а различия между первой группой и третьей объясняются тем, что в этих группах более

всего различалось время воздействия ГБО. Спортсмены-водолазы первой группы испытали гипероксическую гипоксию после минимальной экспозиции гипербарического кислорода, представители третьей группы были выведены из барокамеры в состоянии выраженной ваготонии, а во второй группе декомпенсация начала развиваться после более длительной, в сравнении с первой группой, оксигенации и близкой по длительности с таковой у испытуемых третьей группы [4, 6, 10].

### 5. Выводы

1. Определена индивидуальная устойчивость к токсическому действию кислорода, на основании полученных результатов испытуемые разделены на группы устойчивых и неустойчивых.

2. Определены с высокой достоверностью три наиболее значимых ( $p < 0,001$ ) основных признака (VLF ( $\text{m}^2$ ), VLF % и Alpha 2), которые обладают умеренной отрицательной корреляционной связью ( $-0,70 < r < -0,30$ ) с уровнями устойчивости спортсменов-дайверов к токсическому действию кислорода.

3. Наблюдения за спортсменами с высокой устойчивостью к токсическому действию кислорода показали, что для них характерны изменения гемодинамики по ваготоническому типу, тогда как для неустойчивых был характерен симпатикотонический тип регуляции.

4. Анализ результатов продемонстрировал умеренную корреляционную связь BCP с признаками токсического действия кислорода на организм дайверов. Метод анализа BCP рекомендуется для достоверной ( $p < 0,05$ ) диагностики устойчивости организма спортсменов-дайверов к токсическому действию кислорода.

### Вклад авторов:

Самойлов Александр Сергеевич — редактирование.

Никонов Роман Владимирович — сбор и обработка материала, написание текста.

Пустовойт Василий Игоревич — концепция и дизайн исследования, статистическая обработка, написание текста.

Ключников Михаил Сергеевич — редактирование.

### Authors' contributions:

Alexander S. Samoilov — editing.

Roman V. Nikonov — collection and processing of material, writing the text.

Vasily I. Pustovoyt — concept and design of the study, statistical processing, writing the text.

Mikhail S. Kljuchnikov — editing.

### Список литературы

1. Шитов А.Ю., Кулешов В.И., Makeev B.L. Способ определения степени устойчивости человека к гипероксической гипоксии. Патент RU2 417 788C1. 03.11.2009.
2. 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. СПб.: ВМедА; 2015. 203 с.
3. Hirayanagi K., Nakabayashi K., Okonogi K., Ohiwa H. Autonomic nervous activity and stress hormones induced by hyperbaric saturation diving. Undersea Hyperb Med. 2003;30(1):47–55.
4. 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 Biol. 2019;(27):101159. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101159>

### References

1. Shitov A.Yu., Kuleshov V.I., Makeev B.L. Method for determining the degree of human resistance to hyperoxic hypoxia. Patent RU 2 417 788 C1. 2009 Nov. 3 (In Russ.).
2. Bobrov Yu.M., Kuleshov V.I., Myasnikov A.A. Preservation and improvement of military-professional efficiency of fleet specialists in the process of training and combat activities and in extreme situations. Saint Petersburg: VMedA; 2015. 203 p. (In Russ.).
3. Hirayanagi K., Nakabayashi K., Okonogi K., Ohiwa H. Autonomic nervous activity and stress hormones induced by hyperbaric saturation diving. Undersea Hyperb Med. 2003;30(1):47–55.
4. 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 Biol. 2019;(27):101159. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101159>

5. Yamazaki F, Wada F, Nagaya K, Torii R, Endo Y, Saga-wa S., et al. Autonomic mechanisms of bradycardia during nitrox exposure at 3 atmospheres absolute in humans. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(6):643–648.
6. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски и их медицинское обеспечение. М.: Слово; 2015. 608 с.
7. Sassi R, Cerutti S, Lombardi F, Malik M., Huikuri H.V., Peng C. Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society. *Europace.* 2015;(17):1341–1353. <https://doi.org/10.1093/europace/euv015>
8. Tarvainen M.P., Lipponen J., Niskanen J.P., Ranta-Aho P. Kubios HRV Version 3.3 — User's Guide. Kuopio: University of Eastern Finland; 2019. 40 p.
9. Baevskiy R.M., Chernikova A.G. Analysis of heart rate variability: physiological bases and main methods of conducting. *Cardiometry.* 2017;(10):66–76. <https://doi.org/10.12710/cardiometry.2017.6676>
10. Shaffer F, Ginsberg J.P. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health.* 2017; 5:258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
11. Флейшман А.Н., Кораблина Т.В., Петровский С.А., Мартынов И.Д. Сложная структура и нелинейное поведение very low frequency variability ритма сердца: модели анализа и практические приложения. *Известия ВУЗ. Прикладная нелинейная динамика.* 2014;22(1):55–70. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-55-70>
12. Хаспекова Н. Б. Регуляция вариативности ритма сердца у здоровых и больных с психогенной и органической патологией мозга [диссертация]. М.; 1996. 236 с.
13. Сосиновская Е.В., Черкасов Н.С., Цоцонава Ж.М., Полухина А.Л. Спектральные параметры вариативности сердечного ритма в оценке сердечной деятельности детей, страдающих эпилепсией. *Астраханский медицинский журнал.* 2014;(1):78–83.
14. Yun-LiYu, Na-NaLi, Meng-TingShi, Hong-Juan Lu. Analysis of heart rate variability-related indexes in the interictal period in patients with focal epilepsy. *Life Sciences.* 2018;209:403–408. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.08.033>
15. Van der Kruijs S.J., Vonck K.E., Langereis G.R., Feijs L.M., Bodde N.M., Lazeron R.H., et al. Autonomic nervous system functioning associated with psychogenic nonepileptic seizures: Analysis of heart rate variability. *Epilepsy Behav.* 2016;54:14–19. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2015.10.014>
16. Velez M., Fisher R.S., Bartlett V., Le S. Tracking generalized tonic-clonic seizures with a wrist accelerometer linked to an online database. *Seizure.* 2016;39:13–18. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.04.009>
17. Van de Vel A., Cuppens K., Bonroy B., Milosevic M., Jansen K., Van Huffel S., et al. Non-EEG seizure detection systems and potential SUDEP prevention: State of the art. *Seizure.* 2016;41:141–153. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2013.02.012>
5. Yamazaki F, Wada F, Nagaya K, Torii R, Endo Y, Saga-wa S., et al. Autonomic mechanisms of bradycardia during nitrox exposure at 3 atmospheres absolute in humans. *Aviat Space Environ Med.* 2003;74(6):643–648.
6. Smolin V.V., Sokolov G.M., Pavlov B.N. Diving slopes and their medical supervision. Moscow: Slovo Publ.; 2015. 608 p. (In Russ.).
7. Sassi R, Cerutti S, Lombardi F, Malik M., Huikuri H.V., Peng C. Advances in heart rate variability signal analysis: joint position statement by the e-Cardiology ESC Working Group and the European Heart Rhythm Association co-endorsed by the Asia Pacific Heart Rhythm Society. *Europace.* 2015;(17):1341–1353. <https://doi.org/10.1093/europace/euv015>
8. Tarvainen M.P., Lipponen J., Niskanen J.P., Ranta-Aho P. Kubios HRV Version 3.3 — User's Guide. Kuopio: University of Eastern Finland; 2019. 40 p.
9. Baevskiy R.M., Chernikova A.G. Analysis of heart rate variability: physiological bases and main methods of conducting. *Cardiometry.* 2017;(10): 66–76. <https://doi.org/10.12710/cardiometry.2017.10.6676>
10. Shaffer F, Ginsberg J.P. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Front Public Health.* 2017;5:258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
11. Fleishman A.N., Korablina T.V., Petrovskiy S.A., Martynov I.D. Complex structure and nonlinear behavior of very low frequency heart rate variability: analysis models and practical applications. *Izvestiya VUZ. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Applied nonlinear dynamics. Izvestiya VUZ.* 2014; 22(1): 55–70 (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2014-22-1-55-70>
12. Khaspekova N B. Regulyatsiya variativnosti ritma serdtsa u zdorovykh i bol'nykh s psikhogennoy i organicheskoy patologiyey mozga [dissertation]. Moscow; 1996. 236 p. (In Russ.).
13. Sosinovskaya E.V., Cherkasov N.S., Tsotsonava Zh.M., Polukhina A.L. Spectral parameters of heart rate variability in the assessment of cardiac activity in children with epilepsy. *Astrakhanskiy meditsinskiy zhurnal = Astrakhan Medical Journal.* 2014;(1):78–83 (In Russ.).
14. Yun-LiYu, Na-NaLi, Meng-TingShi, Hong-Juan Lu. Analysis of heart rate variability-related indexes in the interictal period in patients with focal epilepsy. *Life Sciences.* 2018;209:403–408. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2018.08.033>
15. Van der Kruijs S.J., Vonck K.E., Langereis G.R., Feijs L.M., Bodde N.M., Lazeron R.H., et al. Autonomic nervous system functioning associated with psychogenic nonepileptic seizures: Analysis of heart rate variability. *Epilepsy Behav.* 2016;54:14–19. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2015.10.014>
16. Velez M., Fisher R.S., Bartlett V., Le S. Tracking generalized tonic-clonic seizures with a wrist accelerometer linked to an online database. *Seizure.* 2016;39:13–18. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2016.04.009>
17. Van de Vel A., Cuppens K., Bonroy B., Milosevic M., Jansen K., Van Huffel S., et al. Non-EEG seizure detection systems and potential SUDEP prevention: State of the art. *Seizure.* 2016;41:141–153. <https://doi.org/10.1016/j.seizure.2013.02.012>

**Информация об авторах:**

**Самойлов Александр Сергеевич**, д.м.н., профессор, генеральный директор ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России», член-корр. РАН, 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, 23. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9241-7238>

**Никонов Роман Владимирович\***, аспирант кафедры восстановительной медицины, спортивной медицины, курортологии и физиотерапии с курсом сестринского дела МБУ ИНО ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, 23. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2088-5312> (+7 (978) 099-12-09, [sciproduction@yandex.ru](mailto:sciproduction@yandex.ru))

**Пустовойт Василий Игоревич**, к.м.н., младший научный сотрудник лаборатории больших данных и прецизионной спортивной медицины ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, 23. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3396-5813>

**Ключников Михаил Сергеевич**, к.б.н., заведующий лабораторией больших данных и прецизионной спортивной медицины, ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России», 123098, Россия, Москва, ул. Маршала Новикова, 23.

**Information about the authors:**

**Alexander S. Samoilov**, M.D., D.Sc. (Medicine), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, General Director of the State Research Center — A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, 23, Marshala Novikova str., Moscow, 123098, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9241-7238>

**Roman V. Nikonov\***, Postgraduate Student of Department of Rehabilitation Medicine, sports Medicine, Balneology and Physiotherapy with a course of nursing care of the MBU ICE State Research Center — A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, 23, Marshala Novikova str., Moscow, 123098, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2088-5312> (+7 (978) 099-12-09, [sciproduction@yandex.ru](mailto:sciproduction@yandex.ru))

**Vasily I. Pustovoit**, Ph.D. (Medicine), Junior Researcher of the Laboratory of Big Data and Precision Sports Medicine of the State Research Center — A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, 23, Marshala Novikova str., Moscow, 123098, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3396-5813>

**Mikhail S. Kljuchnikov**, Ph.D. (Biology), Head of the Laboratory of Big Data and Precision Sports Medicine of the State Research Center — A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency of Russia, 23, Marshala Novikova str., Moscow, 123098, Russia.

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author