

# БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 612.2; 616.12

DOI 10.34014/2227-1848-2026-1-109-121

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ ОРГАНИЗМА СПОРТСМЕНОВ НА ОСНОВАНИИ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИЧЕСКИХ МАРКЕРОВ И ГАЗООБМЕНА В МОДЕЛИ ГИПОКСИЧЕСКОГО СТРЕСС-ТЕСТА

Н.В. Балиоз, С.Г. Кривошеков

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины»,  
г. Новосибирск, Россия

*Цель исследования - изучить особенности электроэнцефалографической активности при гипоксическом стресс-тесте у спортсменов 2 циклических видов спорта, различающихся по специфике дыхания при физической нагрузке (пловцы и лыжники), и сопоставить данные ЭЭГ с показателями газообмена.*

*Материалы и методы. Обследовано 43 чел. в возрасте 18–22 лет (14 лыжников, 12 пловцов, 17 чел. из группы контроля). Проводился гипоксический стресс-тест со снижением концентрации O<sub>2</sub> во вдыхаемом воздухе в течение 30 мин с 20,9 % до 10 % с записью показателей газообмена, вентиляции и ЭЭГ.*

*Результаты. Установлено, что на 25-й мин гипоксического теста наблюдается увеличение мощности низкочастотного тета-ритма во всех группах по сравнению с фоном: у пловцов повышение незначительное, в контрольной группе и у лыжников различия достоверны. Во всех группах при гипоксии наблюдается снижение мощности высокочастотного альфа-ритма, наиболее высокой она сохраняется у пловцов. При равном потреблении кислорода в группах проявляются межгрупповые особенности работы кардиореспираторной системы и газообмена: у пловцов достоверно выше легочная вентиляция, частота дыхания и ниже дыхательный объем по сравнению с лыжниками, у лыжников ниже ЧСС, а эффективность дыхания выше, чем у испытуемых других групп. Уровни сатурации в группах в условиях фона не различаются, а при гипоксии показатели пловцов выше ( $p < 0,01$ ) по сравнению с лыжниками. Изменения ритмов ЭЭГ и индивидуальной частоты  $\alpha$ -пика, реакция десинхронизации альфа-ритма, динамика газообмена, АД и индекса Кердо свидетельствуют о том, что пловцы при гипоксической нагрузке лучше сохраняют стабильность мозговой деятельности за счет усиления симпатической активности, газообмена и вентиляции по сравнению с лыжниками, которые, усиливая парасимпатическую активность, снижают электрокортикальную активность и энергозатраты организма.*

**Ключевые слова:** электроэнцефалограмма, гипоксический стресс-тест, газообмен, спортсмены.

**Введение.** Во всем мире отмечается повышенный интерес специалистов к привлечению новых технологий для совершенствования спортивного мастерства. При этом функционирование головного мозга изучается

наравне с функциональными резервами сердца и мышц. Нейрофизиологические исследования показывают, что адаптация к физическим нагрузкам сопровождается образованием новых нейронных связей за счет адап-

тивной нейропластичности мозга, которая в том числе обеспечивает рост функциональных резервов спортсменов [1]. Кроме того, показано, что регулярные физические упражнения не только вызывают функциональные изменения ЦНС, но и влияют на когнитивные функции [2]. Установлено, что элитные спортсмены, помимо развития моторных навыков, демонстрируют высокую сенсомоторную интеграцию, сопряженность работы кардиореспираторной системы, высокие мотивационные и волевые качества, определяющие эталон спортивной формы [3–5]. Имеющиеся в литературе сведения о работе мозга в различных спортивных ситуациях и специфике его изменений в течение индивидуальной спортивной карьеры [6, 7] указывают на вклад центральных механизмов регуляции функций в улучшение спортивных результатов [8–11]. Использование новых методических подходов с применением электроэнцефалографии [12], функциональной магнитно-резонансной томографии [13], позитронно-эмиссионной томографии [14], однофотонной эмиссионной томографии [15] значительно расширило понимание динамики когнитивных процессов в контексте физической активности и спорта. При этом наиболее доступным методом анализа кортикальной активности мозга остается электроэнцефалография (ЭЭГ).

Для изучения функциональных резервов организма широко используются методы оценки его ответов на фактор гипоксии. Установлены отличительные особенности двух типов гипоксических состояний: гипоксии нагрузки при мышечной деятельности и гипоксической гипоксии в горах. В работе М.М. Филиппова и соавт. отмечено, что причиной возникновения гипоксии нагрузки является не артериальная гипоксемия, являющаяся обязательным условием для развития горной гипоксии, а несоответствие между возможностями систем и органов доставлять кислород клеткам и увеличенным кислородным запросом [16]. Использование нормобарической гипоксии для тестирования спортсменов на гипоксическую устойчивость (гипоксический стресс-тест) позволило получить целый

ряд интересных результатов. Были обнаружены не только физиологические, но и биохимические, а также генетические механизмы формирования устойчивости человека к гипоксии и разработаны подходы для ее прогнозирования. Применение гипоксических тестов без физической нагрузки позволяет оценивать индивидуальную гипоксическую устойчивость организма, на которую, как предполагается, оказывает влияние спортивная деятельность [11, 17–19].

Одним из продуктивных подходов в оценке функционального состояния ЦНС признано изучение ЭЭГ и мозговой активности в условиях гипоксии [19]. Головной мозг является наиболее чувствительным к гипоксии органом, поэтому характер изменений его биоэлектрической активности в гипоксическом тесте служит одним из критериев выраженности гипоксии нагрузки. Так, показано, что под влиянием нормобарической гипоксии происходит изменение центрального контроля функции кардиореспираторной системы [20, 21]. С другой стороны, получены сведения, что разные виды физической нагрузки (циклическая либо силовая) оказывают неодинаковое влияние на церебральную гемодинамику, кровенаполнение и тонус сосудов [22], а также на когнитивные функции и биоэлектрическую активность головного мозга у спортсменов [23].

Таким образом, можно предполагать, что регулярные физические нагрузки способствуют развитию специфической нейропластичности, которая обеспечивает защиту мозга при возникновении гипоксического состояния. По-видимому, занятия спортом содействуют совершенствованию центральных механизмов регуляции функций кровообращения и дыхания, позволяющих поддерживать адекватное кровоснабжение мозга в условиях гипоксии нагрузки. Не исключено, что специфика тренировочного процесса находит отражение в характере изменений ритмов ЭЭГ в ответ на гипоксический стимул.

**Цель исследования.** Изучить особенности электроэнцефалографической активности головного мозга при гипоксическом воздействии у спортсменов 2 циклических видов

спорта, различающихся по специфике дыхания при физической нагрузке (пловцы и лыжники), и сопоставить полученные данные ЭЭГ с показателями газообмена.

Рабочая гипотеза предполагала, что спортсмены, тренирующиеся в режимах свободного дыхания (лыжники) и дыхания с повышенным сопротивлением (пловцы), при выполнении теста с острым гипоксическим воздействием могут демонстрировать различия по показателям электроэнцефалографии, связанные с кардиореспираторными характеристиками.

**Материалы и методы.** Оценивались изменения показателей биоэлектрической активности мозга (ритмы ЭЭГ) и показатели газообмена в фоне (дыхание атмосферным воздухом 20,9 % O<sub>2</sub> через маску) и во время 30-минутного гипоксического стресс-теста (дыхание гипоксической смесью).

Обследовано 43 чел. в возрасте 18–22 лет, сопоставимых по возрастным и весо-ростовым характеристикам: 17 чел. – контроль (не спортсмены) и 26 чел. – спортсмены (первого спортивного разряда и кандидаты в мастера спорта: 14 лыжников и 12 пловцов).

В качестве тестирующего воздействия использовался единообразный острый гипоксический стресс-тест с плавным снижением концентрации O<sub>2</sub> во вдыхаемом воздухе в течение 30 мин с 20,9 % до 10 % и записью показателей газообмена, вентиляции и ЭЭГ. Гипоксическую газовую смесь готовили с помощью кислородного концентратора NewLife компании AirStep (США).

Регистрация показателей электроэнцефалографии проводилась при выполнении функциональной пробы с открыванием глаз (1 мин при закрытых глазах и 30 с – при открытых) в фоне и на 25-й мин гипоксической нагрузки на программно-аппаратном комплексе БИ-012-2 (Новосибирск, Россия).

Был применен монополярный монтаж электродов с помещением активного электрода в отведение Pz, а референтного – на мочку правого уха. Заземляющий электрод также располагался на мочке правого уха. Точка Pz была выбрана в связи с тем, что в

теменно-затылочной области характеристики альфа-активности наиболее устойчивы и наименее переменны при повторных измерениях, а выраженная тета- и дельта-активность как признак нарастающей гипоксии мозга появляется позже, чем в лобных зонах.

Частота максимального альфа-пика и глубина десинхронизации оценивались при сравнении спектров ЭЭГ при закрытых и открытых глазах.

Для анализа использовались последние чистые (без артефактов) 30-секундные записи ЭЭГ: 4 эпохи по 5 с перед открыванием глаз и 4 эпохи по 5 с после открывания глаз. Свободный от артефактов сигнал ЭЭГ отфильтровывался (для основных ритмов  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) и подвергался быстрому преобразованию Фурье в полосе 0,3–30,0 Гц.

Выходные данные анализировались с помощью специализированной программы Win EEG («Мицар», Санкт-Петербург), составленной в соответствии с принятыми стандартами анализа сигнала, и представлены в виде таблицы спектральной мощности ЭЭГ с шагом 1 Гц.

Спектры мощности оценивали в диапазонах  $\theta$ -ритма (4–7 Гц),  $\alpha$ -ритма (8–13 Гц),  $\beta$ -ритма (14–30 Гц). Для контроля артефактов записывалась миограмма мышц лба.

Выраженность реакции  $\alpha$ -десинхронизации (индивидуальная глубина снижения мощности альфа-ритма, ИГСМА) оценивалась по снижению мощности альфа-ритма в реакции на открывание глаз по формуле

$$\text{ИГСМА (\%)} = (\text{M}_{\text{ог}}/\text{M}_{\text{зг}}) \times 100.$$

Этот показатель отражает процентное снижение мощности альфа-ритма при открывании глаз по сравнению с показателями при закрытых глазах.

Также оценивалась индивидуальная частота мощности альфа-пика (ИЧМПА) как индивидуальное значение максимальной мощности альфа-волн в ЭЭГ-сигнале мозга, которое находится в стандартном альфа-диапазоне.

Показатели газообмена и вентиляции регистрировались на газоанализаторе Охусон Pro® («ЭрихЭгер»). Измеряли легочную вентиляцию (VE, л/мин), частоту дыхания (BF, вдох./мин), дыхательный объем (VT, л), скорость потребления кислорода (VO<sub>2</sub>, л/мин), вентиляционный эквивалент для O<sub>2</sub> (EqO<sub>2</sub>, л/л), частоту пульса (HR, уд./мин). Полученные данные автоматически приводились к системе ВTPS.

Оценка сатурации (SaO<sub>2</sub>, %) проводилась с помощью прибора «Оксиметр ВСІ 3304 Autocorr» (США).

Регистрация артериального давления и проба Кердо осуществлялись в фоне и в конце гипоксического теста.

Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики и одобрены этическим комитетом ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (протокол № 2 от 21.04.2022).

Результаты и обсуждение. Результаты анализа мощности основных ритмов ЭЭГ в фоне и на 25-й мин гипоксического воздействия представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

**Показатели мощности основных ритмов ЭЭГ (мкВ<sup>2</sup>) и ИГСМА (%) в фоне и конце гипоксического теста, M±m**  
**Power spectral density of major EEG rhythms (μV<sup>2</sup>) and individual depth of alpha power reduction (%) at baseline and at the end of the hypoxic test, M±m**

Показатель Parameter	Группа Group			Значимость различий Significance of differences		
	Контроль, n=17 Control, n=17	Пловцы, n=12 Swimmers, n=12	Лыжники, n=14 Skiers, n=14	1-2	2-3	1-3
	1	2	3			
Исходное состояние (фон) Baseline						
θ	9,11±2,61	8,20±2,70	8,66±1,30			
α	26,82±5,2	36,46±8,99	27,09±6,83			
β	3,59±0,91	3,16±0,72	3,34±0,60			
ИГСМА IDAPR	80	92	76		#	
25-я мин гипоксии Hypoxia, 25 min						
θ	22,08±1,62*	9,8±2,81	20,94±1,31*	#	#	
α	18,72±6,14	24,25±7,4*	19,55±4,8			
β	4,21±1,3	3,04±0,63	3,94±0,74			
ИГСМА IDAPR	72	85	74			

**Примечание.** \* – достоверные различия в сравнении с фоном; # – достоверные различия между группами (p≤0,05).

**Note.** \* – the differences are significant compared with baseline; # – significant differences between groups (p≤0.05); IDAPR – individual depth of alpha power reduction.

Оценка данных показывает, что в фоне по всем показателям основных ритмов ЭЭГ межгрупповые отличия отсутствуют. Вместе с тем мощность альфа-ритма при открывании глаз по сравнению с показателями при закрытых глазах (ИГСМА, %) в группе пловцов сохраняется на более высоком уровне (92 %), чем в других группах, при этом при сопоставлении с лыжниками различия достоверны ( $p \leq 0.05$ ).

На 25-й мин гипоксического теста наблюдается явное увеличение мощности низкочастотного тета-ритма во всех группах, но при этом в группе пловцов повышение незначительно, тогда как в контрольной группе и у лыжников оно достоверно. Снижение мощности альфа-ритма отмечено также у всех испытуемых. В литературе усиление низкочастотных ритмов (тета) и снижение мощности высокочастотных ритмов (альфа) при гипоксии расцениваются как признаки возникновения гипоксии мозга, а выраженность их изменений используется для оценки гипоксической устойчивости испытуемого [17].

Также следует отметить, что у пловцов показатели мощности тета-ритма имеют наименьшие значения по сравнению с другими обследуемыми как в фоне, так и при ги-

поксии, что, вероятно, может служить признаком более высокой адаптивной гипоксической устойчивости у спортсменов этой группы. Можно предполагать, что мозг пловцов по сравнению с контролем и лыжниками испытывает менее выраженное состояние гипоксемии, что может быть связано с более ранним включением компенсаторных реакций со стороны кардиореспираторной системы при возникновении гипоксической гипоксемии. Показатели бета-ритма в гипоксическом тесте не показали достоверных различий по сравнению с фоном во всех группах (табл. 1).

Анализ изменений индивидуальной частоты альфа-пика (ИЧМПА) на 25-й мин гипоксического теста (табл. 2) показал снижение показателей (т.е. смещение пика  $\alpha$ -ритма в низкочастотную зону) у всех испытуемых, но достоверным оно было только в контрольной группе. Причины подобных различий между спортсменами и контролем требуют дальнейшего изучения, но, вероятно, они связаны с повышенной защитой мозговых структур от гипоксии у спортсменов по сравнению с нетренированными людьми.

Результаты анализа газообмена и работы кардиореспираторной системы представлены в табл. 3.

Таблица 2  
Table 2

**Показатели ИЧМПА (Гц) в фоне и конце гипоксического теста,  $M \pm m$**

**Individual alpha peak frequency (Hz) at baseline and at the end of the hypoxic test,  $M \pm m$**

ИЧМПА IAPF	Контроль, n=17 Control, n=17	Пловцы, n=12 Swimmers, n=12	Лыжники, n=14 Skiers, n=14
Фон Baseline	10,2±0,3	10,4±0,4	10,3±0,2
Гипоксия Hypoxia	8,9±0,7*	10,0±0,5	9,6±0,8

**Примечание.** \* – достоверные различия между фоном и гипоксией ( $p \leq 0,05$ ).

**Note.** \* – significant differences between baseline and hypoxia ( $p \leq 0.05$ ).

Таблица 3  
Table 3Показатели газообмена и кардиореспираторной системы у испытуемых  
в фоне и конце гипоксического теста,  $M \pm m$ Gas exchange and cardiorespiratory parameters at baseline  
and at the end of the hypoxic test,  $M \pm m$ 

Показатель Parameter	Группа Group			Значимость различий Significance of differences		
	Контроль (n=17) Control (n=17)	Пловцы (n=12) Swimmers(n=12)	Лыжники (n=14) Skiers (n=14)	1-2	2-3	1-3
	1	2	3			
Исходное состояние (фон) Baseline						
VO <sub>2</sub> , л/мин VO <sub>2</sub> , L/min)	0,28±0,02	0,31±0,02	0,30±0,02			
HR, уд./мин HR, beats/min	76,4±6,31	74,3±8,54	65,6±4,12			**
VE, л/мин VE, L/min	11,4±2,5	12,7±3,5	10,2±3,6			
VT, л VT, L	0,79±0,4	0,75±0,6	0,84±0,5			
BF, вдых./мин BF, breaths/min	12,6±2,8	13,4±3,6	12,3±3,2			
EqO <sub>2</sub> , л/л EqO <sub>2</sub> , L/L	36,8±6,11	36,9±2,90	30,7±3,02		*	*
SaO <sub>2</sub> , %	98,2±2,3	98,3±1,4	98,1±3,4			
25-я мин гипоксии Hypoxia, 25 min						
VO <sub>2</sub> , л/мин VO <sub>2</sub> , L/min	0,29±0,03	0,32±0,01	0,30±0,02			
HR, уд./мин HR, beats/min	96,6±8,11	91,0±3,93	81,1±5,52		*	**
VE, л/мин VE, L/min	12,8±3,97	14,2±2,35	11,3±1,37		*	
VT, л VT, L	0,96±0,52	0,78±0,21	1,07±0,17		*	
BF, вдых./мин BF, breaths/min	14,3±4,2	17,5±5,51	11,6±3,67		*	
EqO <sub>2</sub> , л/л EqO <sub>2</sub> , L/L	45,6±3,70	42,8±2,39	36,3±2,18		*	**
SaO <sub>2</sub> , %	78,9±6,30	81,7±2,31	76,6±3,32		**	

**Примечание.** 1) VE – легочная вентиляция, BF – частота дыхания, VT – дыхательный объем, VO<sub>2</sub> – скорость потребления кислорода, EqO<sub>2</sub> – вентиляторный эквивалент для O<sub>2</sub>, HR – частота пульса, SaO<sub>2</sub> – сатурация гемоглобина крови кислородом; 2) достоверность отличий между группами: \* – p<0,05, \*\* – p<0,01.

**Note.** 1) VE – pulmonary ventilation, BF – breathing frequency, VT – tidal volume, VO<sub>2</sub> – oxygen consumption rate, EqO<sub>2</sub> – ventilation equivalent for O<sub>2</sub>, HR – heart rate, SaO<sub>2</sub> – oxygen saturation of hemoglobin; \* – significant differences between groups, p<0,05, \*\* – significant differences between groups, p<0,01.

В исходном состоянии межгрупповые различия показателей газообмена (VO<sub>2</sub>, VE, VT) невелики и отражают особенности, касающиеся

экономичности работы дыхания и сердечной деятельности. Так, HR у лыжников ниже, а EqO<sub>2</sub> выше, чем у испытуемых других групп.

В условиях гипоксии при равном потреблении кислорода ( $VO_2$ ) у всех участников исследования проявляются межгрупповые особенности работы кардиореспираторной системы и газообмена, связанные, вероятно, со спецификой тренировок: у пловцов достоверно выше  $VE$ ,  $V_f$  и ниже  $VT$  по сравнению с лыжниками. При межгрупповом сравнении по  $EqO_2$ , который отражает объем воздуха, прокаченного через легкие для получения 1 л кислорода, достоверно самые низкие значения обнаружены у лыжников, что говорит о наиболее высокой эффективности работы системы дыхания. Также обращает на себя внимание, что  $HR$  у лиц, регулярно занимающихся бегом на лыжах, ниже на 16 % по сравнению с пловцами и нетренированными лицами. Уровни  $SaO_2$  в условиях фона в группах не различаются, а при гипоксии у пловцов достоверно ( $p < 0,01$ ) выше

по сравнению с лыжниками. Этот факт мы рассматриваем как проявление адаптивного механизма, который вырабатывается в результате тренировок пловцов и необходим для поддержания мышечной работы при ограниченном доступе кислорода в водной среде.

Межгрупповой анализ баланса активности отделов вегетативной нервной системы (ВНС) по индексу Кердо (ИК) в условиях фона (табл. 4) показал, что в контрольной группе наблюдается баланс отделов симпатической и парасимпатической системы (ИК =  $-4,08 \pm 3,73$ ). У пловцов преобладает симпатическая активность (ИК =  $2,70 \pm 2,31$ ), оказывающая активизирующее влияние на функции кардиореспираторной системы, а у лыжников активность отделов ВНС отчетливо смещена в парасимпатическую сторону: ИК =  $-20,28 \pm 7,92$  ( $p < 0,01$ ).

Таблица 4  
Table 4

**Индекс Кердо, систолическое и диастолическое артериальное давление в фоне периоде и конце гипоксического теста,  $M \pm m$**   
**Kerdo Index, systolic and diastolic blood pressure at baseline and at the end of the hypoxic test,  $M \pm m$**

Показатель Parameter	Контроль (n=17) Control (n=17)	Пловцы (n=12) Swimmers (n=12)	Лыжники (n=14) Skiers (n=14)
Исходное состояние (фон) Baseline			
Индекс Кердо Kerdo index	$-4,08 \pm 3,73$	$2,70 \pm 2,31$	$-20,28 \pm 7,92^{*\wedge}$
Систолическое артериальное давление Systolic blood pressure	$123,08 \pm 2,77$	$125,27 \pm 4,48$	$121,50 \pm 4,01$
Диастолическое артериальное давление Diastolic blood pressure	$74,75 \pm 2,16$	$75,82 \pm 3,89$	$72,93 \pm 2,63$
25-я мин гипоксии Hypoxia, 25 min			
Индекс Кердо Kerdo index	$13,23 \pm 5,9$	$15,44 \pm 8,1$	$3,53 \pm 3,6$
Систолическое артериальное давление Systolic blood pressure	$135,8 \pm 4,6$	$138,6 \pm 4,8$	$136,1 \pm 3,9$
Диастолическое артериальное давление Diastolic blood pressure	$84,2 \pm 2,9$	$87,2 \pm 2,8$	$78,4 \pm 2,5$

**Примечание.** \* – достоверные отличия от контрольной группы ( $p \leq 0,01$ );  $\wedge$  – достоверные отличия между лыжниками и пловцами ( $p \leq 0,01$ ).

**Note.** \* – the differences are significant compared with the control group ( $p \leq 0.01$ );  $\wedge$  – significant differences between skiers and swimmers ( $p \leq 0.01$ ).

В условиях фона достоверные межгрупповые отличия в показателях артериального давления отсутствуют, хотя в группе пловцов значения систолического артериального давления самые высокие (табл. 4).

Анализ функционального состояния ВНС по показателям индекса Кердо в гипоксическом тесте показал повышение симпатической активности во всех группах, но при этом наиболее высокие значения отмечены у пловцов ( $15,44 \pm 8,1$ ), а наиболее низкие – у лыжников ( $3,53 \pm 3,6$ ). Кроме того, обращает на себя внимание незначительное повышение диастолического давления у лыжников (табл. 4).

Таким образом, несмотря на общность физиологических изменений кислород-транспортных функций при циклических мышечных нагрузках, характер мышечных тренировок, по-видимому, влияет на гипоксическую устойчивость спортсменов. У лыжников тренировки проходят в нормоксических условиях, дыхание совершается в свободном режиме, тело находится в вертикальном положении, на него не действуют никакие дополнительные факторы. Тренировка при плавании определяется факторами, связанными с движением в воде, горизонтальным положением тела и большой теплоемкостью воды, а также давлением воды на грудную клетку, затрудняющим дыхательные экскурсии и поступление воздуха в дыхательные пути [24]. Кроме того, дыхание во время плавания синхронизируется с плавательными (гребковыми) циклами: длительность фазы вдоха уменьшается, а выдох удлиняется (по типу рефлекса Геринга – Брейера [25]) и обычно производится под водой (за исключением брасса и плавания на спине), т.е. осуществляется с большим сопротивлением, чем в воздушной среде [26]. Вероятно, у пловцов в процессе длительных тренировок сформирован механизм поддержания высокого уровня насыщения крови кислородом за счет повышенной активности дыхательной и сердечно-сосудистой систем.

Сравнение электроэнцефалографических маркеров функционального состояния ЦНС при гипоксическом стресс-тесте и функционального состояния кардиореспираторной си-

стемы у спортсменов разных циклических видов спорта показало следующее. Мозг пловцов сохраняет более высокую активность в условиях гипоксии, хотя экономичность работы кардиореспираторной системы ниже, чем у лыжников. Из этого следует, что долговременные адаптивные механизмы при занятиях спортивным плаванием настроены на дыхание в среде с повышенным сопротивлением дыхания и предполагают быстрое включение симпатической активации при возникновении гипоксии, в связи с чем они более энергозатратны. Тогда как у лыжников долговременные адаптивные механизмы основаны на усилении парасимпатической регуляции, нацелены на высокий уровень экономичности и снижение энергозатрат, в связи с чем мозг лыжников демонстрирует большее снижение активности в условиях неизбежной гипоксии. При тренировках на выносливость потребность организма в кислороде высокая, в связи с чем специфический характер нагрузок сформировал различные механизмы компенсации.

#### **Выводы:**

1. Исследования биоэлектрической активности мозга у здоровых молодых мужчин (спортсменов и неспортсменов) показали, что в ответ на гипоксическую нагрузку происходят однонаправленные изменения ритмов ЭЭГ, что проявляется в снижении мощности высокочастотных альфа-ритмов и повышении мощности низкочастотных тета-ритмов.

2. При межгрупповом анализе установлено, что в условиях гипоксического стресс-теста наименее выраженные изменения диапазонов альфа- и тета-ритмов наблюдаются у пловцов, что говорит о выработке у них механизмов компенсации в силу специфики тренировочного процесса. В отличие от пловцов, мозг лыжников при неизбежной гипоксии испытывает большую гипоксическую нагрузку, которая проявляется большим снижением мозговой активности. При этом как у лыжников, так и у пловцов прослеживается определенная связь биоэлектрической активности мозга со спецификой ответа газообмена и кардиореспираторной системы на гипоксическое воздействие.

3. Динамика изменения ритмов ЭЭГ, индивидуальной частоты альфа-пика и реакция десинхронизации альфа-ритма свидетельствуют о том, что пловцы по сравнению с лыжниками имеют более совершенные антигипоксические компенсаторные механизмы, которые в условиях появления гипоксического сигнала лучше поддерживают стабильность мозговой активности в условиях гипоксического стресс-теста.

4. Долговременные адаптивные механизмы при занятиях спортивным плаванием более энергозатратны, настроены на дыхание в среде с повышенным сопротивлением дыхания и предполагают быстрое включение симпатической активации при возникновении гипоксии, тогда как у лыжников они нацелены на снижение энергозатрат и основаны на усилении парасимпатической регуляции.

*Работа выполнена за счет средств федерального бюджета, выделенных на проведение фундаментальных научных исследований (тема № 126020216352-2).*

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Вклад авторов**

Концепция и дизайн исследования: Балиоз Н.В., Кривошеков С.Г.

Литературный поиск, участие в исследовании, обработка материала: Балиоз Н.В., Кривошеков С.Г.

Написание и редактирование текста: Балиоз Н.В., Кривошеков С.Г.

#### **Литература**

1. *Yarrow K., Brown P., Krakauer J.W.* Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (8): 585–596. DOI: 10.1038/nrn2672.
2. *Dalen T., Sandmae S., Stevens T.G., Hjelde G.H., Kjosnes T.N., Wisløff U.* Differences in acceleration and high-intensity activities between small-sided games and peak periods of official matches in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 2021; 35 (7): 2018–2024. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003081.
3. *Chang Y., Lee J.J., Seo J.H., Song H.J., Kim Y.T., Lee H.J.* Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR Biomed.* 2011; 24: 366–372. DOI: 10.1002/nbm.1600.
4. *Жуина Д.В., Майдокина Л.Г.* Психологические особенности спортсменов-победителей. Современные проблемы науки и образования. 2014; 6: 1519–1522. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22878836> (дата обращения: 20.02.2023).
5. *Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L.* Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752.
6. *Cabeza R., Albert M., Belleville S., Craik F.I., Duarte A., Grady C.L., Lindenberger U., Nyberg L, Park D.C., Reuter-Lorenz P.A., Rugg M.D., Steffener J., Rajah M.N.* Maintenance, reserve and compensation: the cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 2018; 19: 701–710. DOI: 10.1038/s41583-018-0068-2.
7. *Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag W., Siero J.C., Petridou N.* Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.
8. *Fink A., Rominger C., Benedek M., Perchtold C.M., Papousek I., Weiss E. M., Seidel A., Memmert D.* EEG alpha activity during imagining creative moves in soccer decision-making situations. *Neuropsychologia.* 2018; 114: 118–124. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.025.
9. *Costanzo M.E., VanMeter J.W., Janelle C.M., Braun A., Miller M.W., Oldham J., Bartlett A H Russell, Bradley D Hatfieldet.* Neural efficiency in expert cognitive-motor performers during affective challenge. *J. Mot. Behav.* 2016; 48: 573–588. DOI: 10.1080/00222895.2016.1161591.
10. *Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag W., Siero J.C., Petridou N.* Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.

11. Uryumtsev D.Yu., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I., Baranov V.I., Melnikov V.N., Balioz N.V., Krivoschekov S.G. Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners. *Front. Physiol.* 2020; 11: 630. DOI: 10.3389/fphys.2020.00630.
12. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C., Mathieu P., Thomas H., David Z., Anne-Marie C., Bernard Dan. Brain oscillations in sport: toward EEG biomarkers of performance. *Front. Psychol.* 2016; 7: 246–271. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.00246.
13. Fontes E.B., Okano A.H., De Guio F., Schabert E.J., Min L.L., Basset F.A. Brain activity and perceived exertion during cycling exercise: an fMRI study. *Br. J. Sport Med.* 2015; 49: 556–560. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091924.
14. Boecker H., Drzezga A. A perspective on the future role of brain pet imaging in exercise science. *Neuroimage.* 2016; 131: 73–80. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.021.
15. Shih C.H., Moore K., Browner N., Miriam S., Eran D. Physical activity mediates the association between striatal dopamine transporter availability and cognition in Parkinson’s disease. *Parkinsonism Relat. Disord.* 2019; 62: 68–72. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2019.01.027.
16. Филиппов М.М., Балькин М.В., Ильин В.Н., Портниченко В.И., Евтушенко А.Л. Сравнительная характеристика гипоксии, развивающейся при мышечной деятельности, и гипоксической гипоксии в горах. *Ульяновский медико-биологический журнал.* 2014; 4: 86–95.
17. Ширяева А.И., Фатеев И.В., Кузьмин А.А., Ветряков О.В., Шкарупа А.В. Современные методические подходы к оценке устойчивости к гипоксии и прогнозу физической работоспособности человека в условиях горной местности (обзор литературы). *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки.* 2022; 4: 104–127. DOI: 10.21685/2072-3032-2022-4-11.
18. Диверт В.Э., Вергунов Е.Г., Балиоз Н.В., Кушнир К.Ю., Куликов В.Ю., Кривошеков С.Г. Вегетативный баланс организма и хемореактивные свойства кардиореспираторной системы у альпинистов. *Сибирский научный медицинский журнал.* 2017; 37 (3): 72–78.
19. Сороко С.И., Бекиаев С.С., Рожков В.П. ЭЭГ-маркеры нарушений системной деятельности мозга при гипоксии. *Физиология человека.* 2007; 33 (5): 39–53.
20. Леутин В.П., Платонов Я.Г., Диверт Г.М., Кривошеков С.Г. Изменение центрального контроля функции внешнего дыхания после однократного сеанса прерывистой нормобарической гипоксии. *Физиология человека.* 2003; 29 (1): 13–15.
21. Melnikov V.N., Krivoschekov S.G., Divert V.E., Komlyagina T.G. Baseline values of cardiovascular and respiratory parameters predict response to acute hypoxia in young health men. *J Physiological research.* 2017; 66 (3): 467–479.
22. Kapilevich L.V., Yezhova G.S., Zakharova A.N., Kabachkova A.V., Krivoschekov S.G. Brain Bioelectrical Activity and Cerebral Hemodynamics in Athletes under Combined Cognitive and Physical Loading. *Human Physiology.* 2019; 45 (2): 164–173. DOI: 10.1134/S0362119719010080.
23. Овчинникова Н.А., Медведева Е.В., Ежова Г.С., Кривошеков С.Г., Капилевич Л.В. Влияние физических нагрузок на когнитивные функции и биоэлектрическую активность головного мозга у спортсменов различных специализаций. *Физиология человека.* 2023; 49 (5): 61–73.
24. Pendergast D., Zamparo P., Di Prampero P., Capelli C., Cerretelli P., Termin A., Craig A.Jr., Bushnell D., Paschke D., Mollendorf J. Energy balance of human locomotion in water. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2003; 90 (3-4): 377–386.
25. Feldman J.L. Neurophysiology of breathing in mammals. In: Bloom F.E. (ed.). *Handbook of Physiology. Section 1: The Nervous System.* 1986; 4: 463–524.
26. Maglischo E.W. *Swimming Fastest.* Human Kinetics. Champaign, IL, USA; 2003. 791.

Поступила в редакцию 18.08.2025; принята 07.10.2025.

#### Авторский коллектив

**Балиоз Наталья Владимировна** – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины». 630017, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 4; e-mail: balioznv@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5482-5986>.

**Кривошеков Сергей Георгиевич** – доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины». 630017, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 4; e-mail: krivoschokovsg@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2306-829X>.

#### Образец цитирования

*Балиоз Н.В., Кривошеков С.Г.* Прогнозирование функциональных резервов организма спортсменов на основании комплексного анализа электроэнцефалографических маркеров и газообмена в модели гипоксического стресс-теста. Ульяновский медико-биологический журнал. 2026; 1: 109–121. DOI: 10.34014/2227-1848-2026-1-109-121.

## PREDICTING FUNCTIONAL RESERVES IN ATHLETES BASED ON A COMPREHENSIVE ANALYSIS OF ELECTROENCEPHALOGRAPHIC MARKERS AND GAS EXCHANGE IN A HYPOXIC STRESS TEST MODEL

N.V. Balioz, S.G. Krivoshchekov

Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk, Russia

*The study aims to investigate the features of electroencephalographic activity during a hypoxic stress test in athletes of two cyclic sports (swimmers and skiers) with different breathing patterns during exercise and to correlate EEG data with gas exchange parameters.*

*Materials and Methods.* A total of 43 subjects aged 18–22 years were examined (14 skiers, 12 swimmers, and 17 controls). A 30-minute hypoxic stress test was performed, during which the inspiratory oxygen concentration was reduced from 20.9 % to 10 %. Gas exchange, ventilation, and EEG parameters were continuously recorded throughout the test.

*Results.* It was found that at minute 25 of the hypoxic test, low-frequency theta power increased in all groups compared to baseline; the increase was non-significant in swimmers, whereas significant differences were observed in the control group and skiers. All groups showed a decrease in high-frequency alpha power during hypoxia, with swimmers maintaining the highest levels. Despite equal oxygen consumption across the groups, intergroup differences in cardiorespiratory and gas exchange functions were observed: swimmers exhibited significantly higher pulmonary ventilation and breathing frequency, but lower tidal volume compared to skiers. Skiers demonstrated lower heart rate and higher breathing efficiency than subjects in other groups. Blood oxygen saturation levels did not differ between groups at baseline; however, during hypoxia, swimmers showed higher values compared to skiers ( $p < 0.01$ ). Changes in EEG rhythms and individual alpha peak frequency, alpha desynchronization response, dynamics of gas exchange, blood pressure, and the Kerdo Index, indicate that swimmers maintain higher stability of brain activity under hypoxic stress due to enhanced sympathetic activity, gas exchange, and ventilation. In contrast, skiers appear to increase parasympathetic activity, leading to reduced electrocortical activity and lower energy expenditure.

**Key words:** electroencephalogram, hypoxic stress test, gas exchange, athletes.

*The study was supported by the federal budget as part of fundamental scientific research (Project No. 126020216352-2).*

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

#### Author contributions

Research concept and design: Balioz N.V., Krivoshchekov S.G.

Literature search, participation in the study, and data processing: Balioz N.V., Krivoshchekov S.G.

Text writing and editing: Balioz N.V., Krivoshchekov S.G.

## References

1. Yarrow K., Brown P., Krakauer J.W. Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports. *Nat. Rev. Neurosci.* 2009; 10 (8): 585–596. DOI: 10.1038/nrn2672.
2. Dalen T., Sandmae S., Stevens T.G., Hjelde G.H., Kjøsnes T.N., Wisløff U. Differences in acceleration and high-intensity activities between small-sided games and peak periods of official matches in elite soccer players. *J. Strength Cond. Res.* 2021; 35 (7): 2018–2024. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003081.
3. Chang Y., Lee J.J., Seo J.H., Song H.J., Kim Y.T., Lee H.J. Neural correlates of motor imagery for elite archers. *NMR Biomed.* 2011; 24: 366–372. DOI: 10.1002/nbm.1600.
4. Zhuina D.V., Maydokina L.G. Psikhologicheskiye osobennosti sportsmenov-pobediteley [Psychological characteristics of successful athletes]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya.* 2014; 6: 1519–1522. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22878836> (accessed: February 20, 2023) (in Russian).
5. Zhang L., Qiu F., Zhu H., Xiang M., Zhou L. Neural Efficiency and Acquired Motor Skills: An fMRI Study of Expert Athletes. *Front Psychol.* 2019; 6 (10): 27–38. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02752.
6. Cabeza R., Albert M., Belleville S., Craik F.I., Duarte A., Grady C.L., Lindenberger U., Nyberg L, Park D.C., Reuter-Lorenz P.A., Rugg M.D., Steffener J., Rajah M.N. Maintenance, reserve and compensation: the cognitive neuroscience of healthy ageing. *Nat. Rev. Neurosci.* 2018; 19: 701–710. DOI: 10.1038/s41583-018-0068-2.
7. Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag, W., Siero J.C., Petridou N. Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.
8. Fink A., Rominger C., Benedek M., Perchtold C.M., Papousek I., Weiss E. M., Seidel A., Memmert D. EEG alpha activity during imagining creative moves in soccer decision-making situations. *Neuropsychologia.* 2018; 114: 118–124. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.025.
9. Costanzo M.E., VanMeter J.W., Janelle C.M., Braun A., Miller M.W., Oldham J., Bartlett A H Russell, Bradley D Hatfieldet. Neural efficiency in expert cognitive-motor performers during affective challenge. *J. Mot. Behav.* 2016; 48: 573–588. DOI: 10.1080/00222895.2016.1161591.
10. Dumoulin S.O., Fracasso A., Van der Zwaag W., Siero J.C., Petridou N. Ultra-high field MRI: advancing systems neuroscience towards mesoscopic human brain function. *Neuroimage.* 2018; 168: 345–357. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.01.028.
11. Uryumtsev D.Yu., Gulyaeva V.V., Zinchenko M.I., Baranov V.I., Melnikov V.N., Balioz N.V., Krivoschekov S.G. Effect of acute hypoxia on cardiorespiratory coherence in male runners. *Front. Physiol.* 2020; 11: 630. DOI: 10.3389/fphys.2020.00630.
12. Cheron G., Petit G., Cheron J., Leroy A., Cebolla A., Cevallos C., Mathieu P., Thomas H., David Z., Anne-Marie C., Bernard Dan. Brain oscillations in sport: toward EEG biomarkers of performance. *Front. Psychol.* 2016; 7: 246–271. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.00246.
13. Fontes E.B., Okano A.H., De Guio F., Schabort E.J., Min L.L., Basset F.A. Brain activity and perceived exertion during cycling exercise: an fMRI study. *Br. J. Sport Med.* 2015; 49: 556–560. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091924.
14. Boecker H., Drzezga A. A perspective on the future role of brain pet imaging in exercise science. *Neuroimage.* 2016; 131: 73–80. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.021.
15. Shih C.H., Moore K., Browner N., Miriam S., Eran D. Physical activity mediates the association between striatal dopamine transporter availability and cognition in Parkinson’s disease. *Parkinsonism Relat. Disord.* 2019; 62: 68–72. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2019.01.027.
16. Filippov M.M., Balykin M.V., Il’in V.N., Portnichenko V.I., Evtushenko A.L. Sravnitel’naya kharakteristika gipoksii, razvivayushcheyasya pri myshechnoy deyatelnosti, i gipoksicheskoy gipoksii v gorakh [Comparative analysis of exercise-induced hypoxia and hypoxic hypoxia in mountain environments]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal.* 2014; 4: 86–95 (in Russian).
17. Shirayeva A.I., Fateyev I.V., Kuz’mín A.A., Vetryakov O.V., Shkarupa A.V. Sovremennyye metodicheskiye podkhody k otsenke ustoychivosti k gipoksii i prognozu fizicheskoy rabotosposobnosti cheloveka v usloviyakh gornoy mestnosti (obzor literatury) [Modern methodological approaches to the assessment of hypoxic tolerance and physical working capacity prediction in the mountains (literature review)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskiye nauki.* 2022; 4: 104–127. DOI: 10.21685/2072-3032-2022-4-11 (in Russian).

18. Divert V.E., Vergunov E.G., Balioz N.V., Kushnir K.Yu., Kulikov V.Yu., Krivoshchekov S.G. Vegetativnyy balans organizma i khemoreaktivnyye svoystva kardiorespiratornoy sistemy u al'pinistov [Autonomic balance and chemoreactive properties of the cardiorespiratory system in climbers]. *Sibirskiy nauchnyy meditsinskiy zhurnal*. 2017; 37 (3): 72–78 (in Russian).
19. Soroko S.I., Bekshaev S.S., Rozhkov V.P. EEG-markery narusheniy sistemnoy deyatelnosti mozga pri gipoksii [EEG markers of systemic brain dysfunction during hypoxia]. *Fiziologiya cheloveka*. 2007; 33 (5): 39–53 (in Russian).
20. Leutin V.P., Platonov Ya.G., Divert G.M., Krivoshchekov S.G. Izmeneniye tsentral'nogo kontrolya funktsii vneshnego dykhaniya posle odnokratnogo seansa preryvistoy normobaricheskoy gipoksii [Changes in central control of respiratory function after a single session of intermittent normobaric hypoxia]. *Fiziologiya cheloveka*. 2003; 29 (1): 13–15 (in Russian).
21. Melnikov V.N., Krivoshchekov S.G., Divert V.E., Komlyagina T.G. Baseline values of cardiovascular and respiratory parameters predict response to acute hypoxia in young health men. *J Physiological research*. 2017; 66 (3): 467–479.
22. Kapilevich L.V., Yezhova G.S., Zakharova A.N., Kabachkova A.V., Krivoshchekov S.G. Brain Bioelectrical Activity and Cerebral Hemodynamics in Athletes under Combined Cognitive and Physical Loading. *Human Physiology*. 2019; 45 (2): 164–173. DOI: 10.1134/S0362119719010080.
23. Ovchinnikova N.A., Medvedeva E.V., Yezhova G.S., Krivoshchekov S.G., Kapilevich L.V. Vliyaniye fizicheskikh nagruzok na kognitivnyye funktsii i bioelektricheskuyu aktivnost' golovnoy mozga u sportsmenov razlichnykh spetsializatsiy [Influence of physical loads on cognitive functions and bioelectrical activity of the brain in athletes of various specializations]. *Fiziologiya cheloveka*. 2023; 49 (5): 61–73 (in Russian).
24. Pendergast D., Zamparo P., Di Prampero P., Capelli C., Cerretelli P., Termin A., Craig A.Jr., Bushnell D., Paschke D., Mollendorf J. Energy balance of human locomotion in water. *Eur. J. Appl. Physiol*. 2003; 90 (3–4): 377–386.
25. Feldman J.L. Neurophysiology of breathing in mammals. In: Bloom F.E. (ed.). *Handbook of Physiology. Section 1: The Nervous System*. 1986; 4: 463–524.
26. Maglischo E.W. *Swimming Fastest. Human Kinetics*. Champaign, IL, USA; 2003. 791.

*Received August 18, 2025; accepted October 07, 2025.*

### Information about the authors

**Balioz Natal'ya Vladimirovna**, Candidate of Sciences (Biology), Researcher, Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine. 630017, Russia, Novosibirsk, Timakov St., 4; e-mail: balioznv@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5482-5986>.

**Krivoshchekov Sergey Georgievich**, Doctor of Sciences (Medicine), Professor, Head of Laboratory, Scientific Research Institute of Neurosciences and Medicine. 630017, Russia, Novosibirsk, Timakov St., 4; e-mail: krivoschokovsg@neuronm.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2306-829X>.

### For citation

Balioz N.V., Krivoshchekov S.G. Prognozirovaniye funktsional'nykh rezervov organizma sportsmenov na osnovanii kompleksnogo analiza elektroentsefalograficheskikh markerov i gazoobmena v modeli gipoksicheskogo stress-testa [Predicting functional reserves in athletes based on a comprehensive analysis of electroencephalographic markers and gas exchange in a hypoxic stress test model]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskii zhurnal*. 2026; 1: 109–121. DOI: 10.34014/2227-1848-2026-1-109-121 (in Russian).