

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 612.084

DOI 10.34014/2227-1848-2025-1-68-79

ИЗМЕНЕНИЕ БИОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА ДЕТЕЙ 8–12 ЛЕТ ПОСЛЕ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ГИПОКСИЧЕСКОЙ ТРЕНИРОВКИ

А.Б. Иванов, И.Х. Борукаева, Т.Б. Кипкеева, А.Г. Шокуева,
Ю.В. Искандарова, З.Х. Нажмудинова

ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова»,
г. Нальчик, Россия

Период раннего пубертата сопровождается значительными когнитивными, физическими и эмоциональными нагрузками, что требует поиска методов оптимизации функционального состояния мозга. Интервальная гипоксическая тренировка (ИГТ) активирует адаптационные механизмы, обусловленные гипоксией индуцируемым фактором-1 (HIF-1), что способствует увеличению кислородной емкости крови, улучшению энергообразования и кровоснабжения мозга.

Цель. Изучение особенностей изменений биоэлектрической активности коры головного мозга детей 8–12 лет в процессе адаптации к гипоксии в ходе нормобарической ИГТ.

Материалы и методы. В исследовании приняло участие 95 мальчиков 8–12 лет (50 – основная группа, прошедшая ИГТ, 45 – группа сравнения). Перед курсом ИГТ проводился гипоксический тест (вдыхание смеси с 10–14 % O_2 в течение 10 мин) с мониторингом SpO_2 , ЧСС, АД, времени восстановления сатурации. ИГТ включала чередование периодов гипоксии и нормоксии: 5 дней – 13 % O_2 , 5 дней – 12 % O_2 , 5 дней – 11 % O_2 . Биоэлектрическая активность мозга регистрировалась электроэнцефалографом «Компакт-нейро ЭЭГ» (16 отведений, система «10–20») в покое и при функциональных нагрузках.

Результаты. Гипоксический тест выявил, что при вдыхании смеси с 12 % O_2 уровень SpO_2 снижался до 85 % с восстановлением до 97 % в течение первой минуты восстановительного периода, что свидетельствовало о развитии субкомпенсированной гипоксии, способствующей активации адаптационных механизмов организма. После ИГТ повысились индекс и амплитуда альфа- и бета-ритмов, снизились индекс тета- и дельта-ритмов, а также улучшились реакции на функциональные нагрузки, что свидетельствует о повышении уровня бодрствования и активности нейронных сетей. Субъективное улучшение концентрации внимания, памяти, качества сна и снижение тревожности указывают на улучшение нейропластичности и функционального состояния мозга.

Выводы. Полученные данные демонстрируют перспективность использования ИГТ для повышения устойчивости мозга к нагрузкам, а также для улучшения адаптивных возможностей центральной нервной системы.

Ключевые слова: электроэнцефалограмма, нормобарическая интервальная гипоксическая тренировка, функциональная активность головного мозга, дети 8–12 лет.

Введение. Одним из основных методов оценки зрелости разных отделов ЦНС, отражающим функциональную активность нейронов коры головного мозга, является электроэнцефалография (ЭЭГ) [1]. Созревание различных отделов центральной нервной системы (ЦНС)

сопровождается изменениями в биоэлектрической активности головного мозга, которые тесно связаны с возрастом обследуемых. Несинхронное созревание корковых и подкорковых отделов ЦНС и их различный вклад в формирование ЭЭГ отражаются в особенностях

распределения биоэлектрической активности головного мозга у детей 8–12 лет [2], выявлением которых занимался ряд авторов [3, 4].

Высшая нервная и психическая деятельность, активно развивающаяся в период раннего пубертата, оказывает значительное влияние на общее состояние организма. Улучшается работа подкорковых структур, отвечающих за вегетативные процессы, которые все больше подчиняются коре больших полушарий [5]. Значительная когнитивная, физическая и эмоциональная нагрузка, имеющая место в этом возрасте, обуславливает крайнюю актуальность поиска различных методов, усиливающих функциональную активность головного мозга.

Нормобарическая интервальная гипоксическая тренировка (ИГТ) эффективно применяется для лечения различных заболеваний [6, 7]. Рядом авторов было выявлено влияние ИГТ на биоэлектрическую активность коры головного мозга у детей, больных бронхиальной астмой и хроническим обструктивным бронхитом [8].

Известно, что физиологические реакции на гипоксию регулируются зависимыми от гипоксией индуцируемого фактора-1 сигнальными путями, однако интенсивность и продолжительность гипоксического воздействия могут влиять на активацию различных механизмов [9]. Поэтому важно учитывать, что пациенты могут по-разному реагировать на одинаковые гипоксические условия, что подтверждается различиями в уровнях эндогенной гипоксии и изменении показателей SaO_2 . Адаптационная реакция организма на гипоксию определяется текущим физиологическим состоянием, а также индивидуальной чувствительностью к дефициту кислорода, которая зависит от генетических факторов, возраста и эпигенетических особенностей [10]. Поэтому содержание кислорода в гипоксической газовой смеси необходимо подбирать строго индивидуально, принимая во внимание функциональные возможности организма пациента в момент проведения процедуры.

Исследования С.И. Сороко, С.С. Бекшаева и Ю.А. Сидорова показали, что способ-

ность человека адаптироваться к различным факторам определяется особенностями саморегуляции, устойчивостью и пластичностью нейродинамических процессов, которые отражаются в исходных характеристиках ЭЭГ [11]. Поэтому воздействие на биоэлектрическую активность коры головного мозга для усиления защитно-приспособительных реакций при ИГТ, приводящих к улучшению кровоснабжения и повышению функциональной активности головного мозга, остается актуальным в наши дни.

Цель исследования. Выявить особенности изменений биоэлектрической активности коры головного мозга у детей 8–12 лет при адаптации к интервальной нормобарической гипоксии.

Материалы и методы. Было обследовано 95 здоровых детей мужского пола в возрасте 8–12 лет (средний возраст составил $10,63 \pm 0,14$ года). Основную группу составили 50 детей, которые прошли курс ИГТ. Группу сравнения составили 45 детей, сопоставимых по возрасту и полу, которые не проходили ИГТ. Для регистрации биоэлектрических потенциалов коры головного мозга использовался электроэнцефалограф «Компакт-нейро ЭЭГ» («Нейротех», Россия, 2024) с 16 отведениями по международной системе «10–20». Измерения проводились в затылочных (O1, O2), центральных (C), теменных (P3, P4), лобных (F3, F4) и височных (T3, T4) долях мозга в покое и при функциональных нагрузках с открыванием и закрыванием глаз, фотостимуляции (при воздействии ритмичного светового раздражения вспышками света с частотой от 1 до 50 Гц), звуковой стимуляции (воспроизведение звуковых щелчков через наушники) и гипервентиляции (глубокие и частые вдохи и выдохи в течение 3–5 мин). Анализировались выраженность, регулярность и топографическое распределение основных ритмов ЭЭГ, а также наличие очаговых изменений и эпилептиформной активности до начала курса интервальной гипоксической тренировки и после его завершения в условиях нормоксии.

Гипоксическая смесь подавалась от аппарата OXYTERRA (Россия). Гипоксическая

тренировка проводилась в режиме чередования пятиминутного воздействия гипоксической смеси с пятиминутным интервалом вдыхания воздуха с 20,9 % кислорода на протяжении 4 подходов. Гипоксический тест заключался во вдыхании газовой смеси с 10–14 % содержанием кислорода в течение 10 мин с фиксацией уровня SaO_2 , скорости падения сатурации и скорости ее восстановления до исходных величин. До и сразу после завершения гипоксического теста в условиях нормоксии определялось артериальное давление по методике Короткова автоматическим тонометром Omron M2 Comfort (Япония). По результатам теста в первые 5 дней дети дышали гипоксической смесью с 13 % O_2 , затем 5 дней – с 12 % O_2 и последние 5 дней – с 11 % O_2 .

Все участники перед началом исследования были проинформированы о методике проведения нормобарической ИГТ, о показаниях и противопоказаниях. Проводимое исследование получило одобрение этического комитета ФГБОУ ВО КБГУ им. Х.М. Бербекова (протокол № 16/8 от 21.09.2024).

Для статистической обработки использовались программы Microsoft Excel и Statistica 6,0 для Windows. Вариационные ряды оценивались на нормальность распределения с помощью теста Шапиро – Уилка (критерий Шапиро – Уилка, $p > 0,05$). Анализ распределения

значений показал, что выборки происходили из генеральных совокупностей, имеющих нормальное распределение. Для оценки статистической значимости различий использовали t-критерий Стьюдента. При сравнении независимых выборок использовался непарный (двухвыборочный) критерий Стьюдента, а при сравнении связанных выборок (до и после гипоксической тренировки) – парный t-критерий Стьюдента. Все численные данные представлены как среднее арифметическое значение и стандартная ошибка среднего ($M \pm m$). Различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение. Проведенные исследования показали, что у детей 8–12 лет в условиях нормоксии доминирующим на ЭЭГ являлся альфа-ритм. Максимальные значения его индекса регистрировались в левой затылочной области ($56,64 \pm 1,05$ %), минимальные – в правой фронтальной области ($35,22 \pm 1,13$ %). Такое же распределение имела и амплитуда альфа-ритма ($58,36 \pm 1,46$ мкВ в O1 и $34,16 \pm 0,52$ мкВ в F1).

Индекс бета-волн во фронтальных отделах составлял $2,77 \pm 0,08$ %, в левой затылочной области – $4,94 \pm 0,04$ %, что свидетельствовало о минимальной активности бета-ритма. Его низкая амплитуда была зафиксирована также в центральных отделах с постепенным увеличением в парietальных областях (рис. 1).

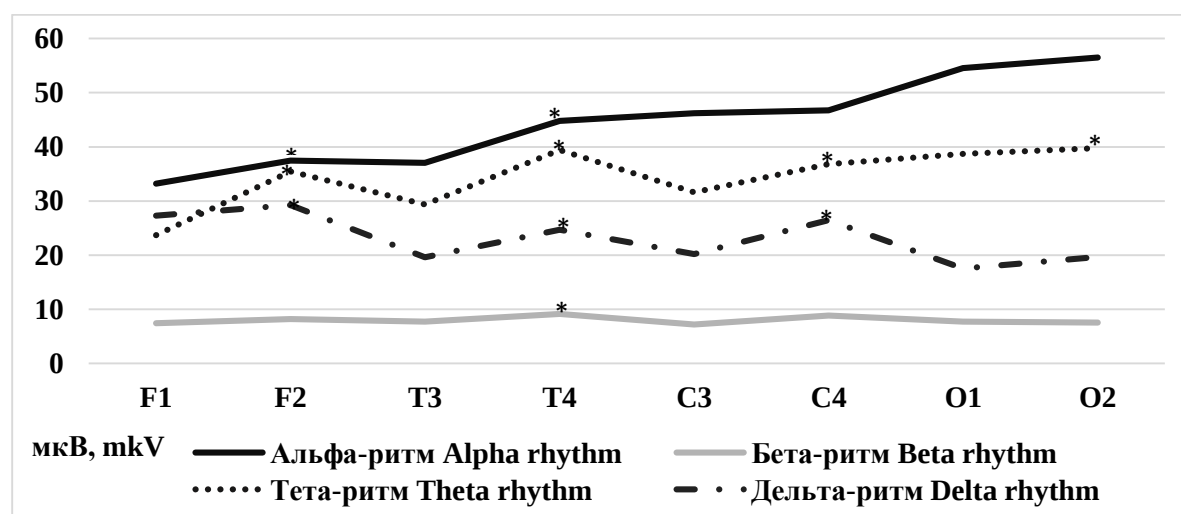


Рис. 1. Показатели амплитуды ритмов ЭЭГ у детей 8–12 лет в условиях нормоксии (* – межполушарные достоверные различия ($p \leq 0,05$))

Fig. 1. EEG rhythm amplitude indices in children aged 8–12 under normal oxygen conditions (* – the interhemispheric differences are significant ($p \leq 0.05$))

Колебания индекса тета-ритма составляли от $22,41 \pm 1,09$ % в F1 до $29,77 \pm 1,27$ % в O2 без выраженной асимметрии в правом и левом полушарии. Амплитуда тета-ритма колебалась от $23,27 \pm 1,06$ мкВ в F1 до $40,83 \pm 2,13$ мкВ в O2 с достоверными ($p < 0,05$) межполушарными различиями. Отмечалось постепенное нарастание индекса дельта-ритма от лобных к затылочным отделам, а его амплитуда достоверно снижалась от фронтальных к затылочным областям (до $17,44 \pm 1,25$ мкВ в O1).

При исследовании ЭЭГ в условиях нормоксии у детей 8–12 лет было выявлено два типа электроэнцефалограмм. На ЭЭГ первого типа выявлялось преобладание медленноволновых колебаний с нерегулярной альфа-активностью; второго типа – отчетливое доминирование быстроволновых колебаний в результате повышения активности альфа-волн с высокой амплитудой практически во всех отведениях ЭЭГ и ярко выраженной межполушарной асимметрией их распределения. Альфа-ритм считается основным ритмом электроэнцефалограммы и является показателем уровня зрелости биоэлектрической активности головного мозга [12–14]. В формировании альфа-ритма, по мнению большинства исследователей, решающая роль принадлежит зрительному анализатору [15]. Это подтверждается распределением биопотенциалов на электроэнцефалограмме в затылочных долях мозга. Выявленные межполушарные различия распределения альфа-ритма являются свидетельством особых взаимодействий функциональных систем правого и левого полушарий в возрасте 8–12 лет [16].

При проведении пробы с открыванием и закрыванием глаз отмечалась десинхронизация альфа-ритма, а при световых раздражителях появлялись эпизоды повышенной медленноволновой активности в виде тета-волн. Реакция на гипервентиляцию проявлялась образованием высокоамплитудных медленных волн. Выявленные всплески высокоамплитудных веретенообразных колебаний на ЭЭГ указывали на доминирующую активность таламических структур у детей 8–12 лет и согласовывались с данными А.Т. Бондарь и Г.Н. Болдыревой [17].

Так как исследуемая группа состояла из детей 8–12 лет, крайне важно было обеспечить безопасность проведения интервальной гипоксической тренировки. С этой целью каждому ребенку была проведена гипоксическая проба для выявления индивидуальной чувствительности к гипоксии и подбора оптимального содержания кислорода в гипоксической смеси. Гипоксический тест переносился хорошо, в восстановительном периоде дети не предъявляли никаких жалоб.

У детей основной группы снижение SaO_2 до 85 % отмечалось при вдыхании гипоксической смеси с 12 % O_2 , восстановление SaO_2 до 97 % отмечалось в течение 1-й мин восстановительного периода (при дыхании атмосферным воздухом с 20,9 % O_2), максимальная ЧСС достигала 116 уд./мин (до теста она составляла $78,46 \pm 2,15$ уд./мин). Систолическое артериальное давление после гипоксического теста достоверно ($p < 0,05$) снизилось с $118,63 \pm 3,31$ мм рт. ст. до $107,63 \pm 3,12$ мм рт. ст. Статистически значимых изменений диастолического давления выявлено не было (до теста – $72,63 \pm 4,26$ мм рт. ст., после – $73,55 \pm 5,62$ мм рт. ст.).

Как показали проведенные исследования, вдыхание здоровыми мальчиками 8–12 лет гипоксической смеси с 12 % O_2 является оптимальным для проведения интервальной гипоксической тренировки, так как при этом содержании кислорода развивается субкомпенсированная гипоксия (SaO_2 – 85 %), которая запускает адаптационные реакции. При снижении SaO_2 ниже 85 % может развиваться декомпенсированная гипоксия, способная оказать повреждающее воздействие на организм детей [18].

После ИГТ в условиях нормоксии у детей 8–12 лет индекс альфа-ритма статистически значимо ($p < 0,05$) возрос практически во всех отделах коры: в O1 – до $54,1 \pm 1,23$ %, в O2 – до $57,1 \pm 1,17$ %, в С – до $47,5 \pm 1,42$ %, в T3 – до $45,6 \pm 1,07$ %, в T4 – до $45,3 \pm 1,15$ %, в F1 – до $32,2 \pm 1,05$ %, в F2 – до $36,0 \pm 1,03$ %.

Индекс бета-ритма достоверно ($p < 0,05$) увеличился лишь в затылочных (в O1 – до $6,2 \pm 0,01$ %, в O2 – до $6,3 \pm 0,03$ %) и височных отведениях (в T3 – до $7,2 \pm 0,17$ %, в T4 – до $6,6 \pm 0,02$ %). Таким образом, повышение сум-

марной быстроволновой активности в теменных, центральных и лобных отведениях было обусловлено в основном повышением индекса альфа-ритма.

После интервальной гипоксической тренировки статистически значимое ($p<0,05$) снижение индекса тета-волн наблюдалось лишь в затылочных (в О1 – до $25,3\pm1,02\%$ и в О2 – до $28,2\pm1,09\%$) областях. В других отведениях достоверных изменений не было выявлено, отмечалась лишь тенденция к снижению.

После адаптации к гипоксии также было отмечено достоверное ($p<0,05$) уменьшение

индекса дельта-волн в затылочных (в О1 – до $14,2\pm1,51\%$, в О2 – до $16,4\pm1,01\%$), центральных (в С – до $18,6\pm1,25\%$) и лобных (в F1 – до $23,1\pm1,72\%$, в F2 – до $23,7\pm1,46\%$) отведениях.

Интервальная гипокситерапия привела также к изменению амплитуды основных ритмов ЭЭГ. Данные табл. 1 свидетельствуют о статистически значимом ($p<0,05$) повышении амплитуды альфа-ритма в F1, F2, T3, T4, P4, O1, O2 по сравнению с группой сравнения, в которой через 15 дней амплитуда альфа-ритма осталась без изменения (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

**Показатели амплитуды альфа- и бета-ритмов ЭЭГ у детей 8–12 лет
после интервальной гипокситерапии**
**EEG alpha- and beta-rhythm amplitude indices in children aged 8–12
after interval hypoxic therapy**

Отведение ЭЭГ EEG lead	Основная группа, n=50 Main group, n=50		Группа сравнения, n=45 Comparison group, n=45	
	Альфа-ритм, мкВ Alpha rhythm, mV	Бета-ритм, мкВ Beta rhythm, mV	Альфа-ритм, мкВ Alpha rhythm, mV	Бета-ритм, мкВ Beta rhythm, mV
F1	37,23±0,33*	6,48±0,01	33,23±0,26	6,41±0,31
F2	42,32±0,18*	6,75±0,15	37,47±0,25	6,19±0,46
T3	44,01±0,27*	7,02±0,47	37,04±0,32	7,72±0,17
T4	48,82±0,27*	6,72±0,22	44,77±0,36	6,14±0,37
C	47,06±0,24	7,65±0,01*	46,19±0,29	6,21±0,31
P3	45,26±0,17	7,02±0,12	42,48±0,18	6,43±0,22
P4	48,55±1,35*	7,03±0,13	43,31±0,16	6,35±0,14
O1	63,16±0,25*	7,82±0,18*	54,57±0,72	6,72±0,31
O2	68,45±1,51*	7,78±0,14*	56,51±1,35	6,57±0,44

Примечание. * – достоверные отличия от показателей при нормоксии, $p<0,05$.

Note. * $p<0.05$ – the differences are significant compared with normoxia.

Амплитуда бета-ритма статистически значимо ($p<0,05$) повысилась в С, О1, О2; в других отведениях достоверных изменений не выявлено. Амплитуда тета-ритма после интервальной гипокситерапии снизилась в левой

лобной (F2), височных (T3, T4), теменных (P3, P4) и затылочных (O1, O2) отведениях. Практически в этих же отведениях отмечалось снижение амплитуды дельта-ритма (табл. 2).

Таблица 2
Table 2Показатели амплитуды тета- и дельта-ритмов ЭЭГ у детей 8–12 лет
после интервальной гипокситерапииAmplitude parameters of EEG theta- and delta-rhythm amplitude indices in children aged 8–12
after interval hypoxic therapy

Отведение ЭЭГ EEG lead	Основная группа, n=50 Main group,		Группа сравнения, n=45 Comparison group,	
	Тета-ритм, мкВ Theta-rhythm, mV	Дельта-ритм, мкВ Delta-rhythm, mV	Тета-ритм, мкВ Theta-rhythm, mV	Дельта-ритм, мкВ Delta-rhythm, mV
F1	25,65±0,41	25,53±1,09	23,71±0,75	27,28±1,35
F2	25,42±1,25*	24,64±1,36*	28,73±0,53	29,24±1,42
T3	24,62±0,26*	18,87±1,47*	29,37±0,32	21,62±1,66
T4	36,26±0,32*	21,54±1,16*	39,43±0,62	24,72±1,28
C	24,24±0,11	18,35±0,94	26,35±0,43	20,21±0,35
P3	21,33±1,04*	20,16±1,12*	25,48±0,33	23,85±1,21
P4	22,32±0,19*	20,31±0,16*	25,27±0,17	24,54±0,27
O1	31,55±1,25*	15,22±1,04*	38,68±1,42	17,53±1,26
O2	32,64±0,64*	16,37±0,95*	39,74±1,26	19,68±1,31

Примечание. * – достоверные отличия от показателей при нормоксии, $p < 0,05$.

Note. * $p < 0.05$ – the differences are significant compared with normoxia.

После интервальной гипокситерапии при проведении пробы с открыванием и закрыванием глаз эпизоды десинхронизации альфа-ритма стали реже, его амплитуда повысилась практически во всех отведениях. При световых раздражителях частота вспышек повышенной медленноволновой активности в виде тета-волн стала снижаться, амплитуда тета-ритма уменьшилась, что может быть связано с ростом внимательности и концентрации и свидетельствует о переходе мозга от более расслабленного состояния к состоянию большей активности и готовности реагировать на различные стимулы. При пробе с гипервентиляцией снизилась амплитуда медленных колебаний, регистрируемых до гипоксической тренировки, что также указывает на повышение готовности головного мозга к активному реагированию на внешние изменения.

Все это стало возможным благодаря адаптационным механизмам, развивающимся при интервальной гипоксической тренировке. Выделение HIF-1, ключевого регулятора

адаптации к гипоксии, стимулирует гены, отвечающие за ангиогенез, гликолиз и эритропоэз, в результате чего происходит увеличение содержания эритропоэтина, гемоглобина, кислородной емкости крови, усиление процессов ангиогенеза, гликолитической активности, утилизации липидов. Повышение биоэнергетической эффективности митохондрий приводит к улучшению энергообразования клетками, в т.ч. и нейронами. Уменьшение образования свободных радикалов кислорода на фоне повышения активности антиоксидантной защиты обеспечивает рост устойчивости нейронов к окислительному стрессу. Увеличение содержания миоглобина помогает связывать и хранить кислород в клетках, обеспечивая его постепенное высвобождение. Активация факторов роста под действием HIF-1 способствует выживанию нейронов, улучшению синаптической пластичности и восстановлению поврежденных клеток [19]. Также при адаптации к гипоксическим тренировкам головной мозг может активировать процессы

нейропластичности, улучшая свои способности к восстановлению и адаптации к изменяющимся условиям [20].

После адаптации к гипоксии в курсе ИГТ дети отмечали уменьшение тревожности, улучшение качества сна, повышение физической активности, улучшение памяти и внимания, облегчение процесса обучения в школе, что указывало на улучшение функциональной активности головного мозга.

Заключение. Проведенное исследование показало, что использование нормобарической интервальной гипоксической тренировки оказывает значительное влияние на биоэлектрическую активность коры головного мозга у детей 8–12 лет. Оптимальный уровень гипоксемии, развивающийся при вдыхании гипоксической смеси с 12 % O₂, ак-

тивировал адаптационные механизмы, что подтверждается статистически значимыми изменениями на электроэнцефалограмме.

После курса интервальной гипоксической тренировки наблюдались увеличение индекса и амплитуды альфа- и бета-ритмов и снижение индекса и амплитуды тета- и дельта-ритмов, что свидетельствует об улучшении функционального состояния коры головного мозга, так как отмечалось улучшение когнитивных функций, эмоционального состояния, физической активности и повышение обучаемости. Выявленные изменения демонстрируют перспективность использования ИГТ для улучшения функционального состояния головного мозга и повышения его адаптационных возможностей у детей в возрасте 8–12 лет.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Концепция и дизайн исследования: Иванов А.Б., Борукаева И.Х.

Литературный поиск, участие в исследовании, обработка материала: Кипкеева Т.Б., Шокуева А.Г.

Статистическая обработка данных: Искандарова Ю.В., Нажмудинова З.Х.

Анализ и интерпретация данных: Борукаева И.Х.

Написание и редактирование текста: Борукаева И.Х., Иванов А.Б.

Литература

1. Болдырева Г.Н., Жаворонкова Л.А., Шарова Е.В. Межцентральные отношения ЭЭГ как отражение системной организации мозга человека в норме и при патологии. Журнал высшей нервной деятельности. 2003; 33 (4): 391–401.
2. Боголепов Н.Н., Фокин В.Ф. Функциональная межполушарная асимметрия. М.: Научный мир; 2004. 728.
3. Будкевич А.В., Иванов Л.Б., Новикова Г.Р., Джанумова Г.М. Возрастное становление корковой ритмики на ЭЭГ в зависимости от формирования индивидуально-психологических особенностей ребенка. Медицинский алфавит. 2019; 1 (8): 42–50. DOI: 10.33667/2078-5631-2019-1-8(383)-42-48.
4. Иванов А.Б., Борукаева И.Х., Абазова З.Х., Молов А.А., Кипкеева Т.Б., Шокуева А.Г., Шхагумов К.Ю. Сравнительный анализ биоэлектрической активности и циркуляторного обеспечения головного мозга у подростков при острой гипоксии. Ульяновский медико-биологический журнал. 2022; 3: 86–97. DOI: 10.34014/2227-1848-2022-3-86-96.
5. Бахтин О.М., Лазуренко Д.М., Кирий В.Н. Физиологические основы биоэлектрической активности мозга. Екатеринбург: Уральский университет; 2012. 256.
6. Игнатенко Г.А., Майлян Э.А., Дубовая А.В., Калуга А.А., Гончаров А.Н., Субботина Е.А. Обоснование применения интервальной гипокситерапии в лечении женщин с аутоиммунным тиреоидитом. Практическая медицина. 2023; 21 (2): 31–37. DOI: 10.32000/2072-1757-2023-2-68-72.
7. Borukaeva I.Kh., Abazova Z.Kh., Ivanov A.B., Shkhagumov K.Yu., Shavaeva F.V., Molov A.A., Kipkeeva T.B., Shokueva A.G. Preservation of the immunomodulatory effect of interval hypoxotherapy after coronavirus infection in the long-term period. Medical Immunology (Russia). 2023; 25 (4): 809–814. DOI: 10.15789/1563-0625-POT-2767.

8. *Борукаева И.Х., Абазова З.Х., Иванов А.Б., Шхагумов К.Ю.* Интервальная гипокситерапия и энтеральная оксигенотерапия в реабилитации пациентов с хронической обструктивной болезнью легких. Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2019; 2: 27–32. DOI: 10.17116/kurort20199602127.
9. *Титова О.Н., Кузубова Н.А., Лебедева Е.С.* Роль гипоксического сигнального пути в адаптации клеток к гипоксии. РМЖ. Медицинское обозрение. 2020; 4 (4): 207–213. DOI: 10.32364/2587-6821-2020-4-4-207-213.
10. *Балыкин М.В., Сагидова С.А., Жарков А.С., Айзятупова Е.Д., Павлов Д.А., Антипов И.В.* Влияние прерывистой гипобарической гипоксии на экспрессию HIF-1A и морфофункциональные изменения в миокарде. Ульяновский медико-биологический журнал. 2017; 2: 125–134. DOI: 10.23648/UMBJ.2017.26.6227.
11. *Сороко С.И., Бекшаев С.С., Сидоров Ю.А.* Основные типы механизмов саморегуляции мозга. Л.: Наука; 1990. 205.
12. *Базанова О.М.* Альфа-ритм мозга: Индикатор функционального состояния и нейрофизиологического резерва. Новосибирск: Академическое издательство; 2010. 304.
13. *Булгакова О.С.* Динамика волн ЭЭГ при различных функциональных состояниях. Обзор исследований российских ученых (2000–2020). Вестник психофизиологии. 2020; 4: 8–17.
14. *Кузнецова Т.Г., Горбачева М.В., Булгакова О.С.* Кросскорреляционный анализ ЭЭГ и асимметрия альфа-ритма у детей 6–7 лет при достижении цели. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015; 10 (5): 845–848. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7641> (дата обращения: 03.02.2025).
15. *Коробейникова И.И., Венерина Я.А., Бирюкова Е.В., Каратыгин Н.А.* Спектральные характеристики альфа-ритма ЭЭГ и временные параметры интеллектуальной деятельности. Психическое здоровье. 2018; 16 (6): 33–39. DOI: 10.25557/2074-014X.2018.06.33-39.
16. *Кузьяев А.Е., Коекина О.И.* Альфа-стробирование сенсорных сигналов мозга и синестезии при доминирующем типе восприятия. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022; 11: 19–29. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13462> (дата обращения: 03.02.2025). DOI: 10.17513/mjpf.13462.
17. *Бондарь А.Т., Болдырева Г.Н.* Возрастные особенности биоэлектрической активности мозга детей. Психофизиология. 2003; 2: 123–129.
18. *Лукьянова Л.Д., Дудченко А.М., Цыбина Т.А., Германова Э.Л., Ткачук Е.Н., Эренбург И.В.* Действие интервальной нормобарической гипоксии на кинетические свойства митохондриальных ферментов. Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2007; 144 (12): 644.
19. *Sazontova T.G., Bolotova A.V., Bedareva I.V., Kostina N.V., Arkhipenko Y.V.* Adaptation to Intermittent Hypoxia/Hyperoxia Enhances Efficiency of Exercise Training. Intermittent Hypoxia and Human Diseases. 2012; 16: 191–205. DOI: 10.1007/978-1-4471-2906-6_16.
20. *Pugha C.W., Ratcliffe P.J.* New horizons in hypoxia signaling pathways. Experimental Cell Research. 2017; 356: 116–121. DOI: 10.1016/j.yexcr.2017.03.008.

Поступила в редакцию 19.01.2025; принята 21.02.2025.

Авторский коллектив

Иванов Анатолий Беталович – доктор биологических наук, профессор кафедры нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: abivanov@rambler.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-167X>.

Борукаева Ирина Хасанбиевна – доктор медицинских наук, заведующий кафедрой нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: irborukaeva@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1180-228X>.

Кипкеева Татьяна Борисовна – старший преподаватель кафедры нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: kipkeevatatiana70@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-0995>.

Шокуева Асият Гисаевна – старший преподаватель кафедры нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: schokueva@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3540-119X>.

Искандарова Юлия Владиславовна – ассистент кафедры нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: juliaa-1994@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9629-4968>.

Нажмудинова Залина Халидовна – ассистент кафедры нормальной и патологической физиологии человека Медицинской академии, ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова». 360000, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173; e-mail: zalinanazhmudinova@icloud.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1264-3787>.

Образец цитирования

Иванов А.Б., Борукаева И.Х., Кипкеева Т.Б., Шокуева А.Г., Искандарова Ю.В., Нажмудинова З.Х. Изменение биоэлектрической активности коры головного мозга детей 8–12 лет после интервальной гипоксической тренировки. Ульяновский медико-биологический журнал. 2025; 1: 68–79. DOI: 10.34014/2227-1848-2025-1-68-79.

CHANGES IN BIOELECTRICAL ACTIVITY OF THE CEREBRAL CORTEX IN CHILDREN AGED 8–12 AFTER INTERVAL HYPOXIC TRAINING

A.B. Ivanov, I.Kh. Borukaeva, T.B. Kipkeeva, A.G. Shokueva,
Yu.V. Iskandarova, Z.Kh. Nazhmudinova

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

The period of early puberty is accompanied by significant cognitive, physical and emotional stress, which requires methods to optimize the functional brain state. Interval hypoxic training (IHT) activates adaptation mechanisms caused by hypoxia-inducible factor-1 (HIF-1), which increases the oxygen capacity of the blood, improve energy production and cerebral blood supply.

Objective. The aim of the paper is to study the changes in the bioelectrical activity of the cerebral cortex in children aged 8–12 while adaptating to hypoxia during normobaric IHT.

Materials and Methods. The study involved 95 boys aged 8–12 (main group – 50 trial subjects after IHT, comparison group – 45 trial subjects). Before the IHT, a hypoxic test was performed (10-minute inhalation of oxygen mixture (O₂ 10–14 %) with monitoring of SaO₂, HR, BP, and saturation recovery time. IHT included sequences of hypoxia and normoxia: 5 days – 13 % O₂, 5 days – 12 % O₂, 5 days – 11 % O₂. Compact-Neuro EEG electroencephalograph (16 leads, 10–20 system) was used to record cerebral bioelectrical activity at rest and under functional loads.

Results. The hypoxic test revealed that when inhaling a mixture with 12 % O₂, the SaO₂ level decreased up to 85 % with a recovery to 97 % during the first minute of the recovery period, indicating the development of subcompensated hypoxia, which contributes to the activation of the body's adaptive mechanisms. After IHT, the index and amplitude of alpha and beta rhythms increased, the index of theta and delta rhythms decreased. Moreover, reactions to functional loads improved, indicating increased alertness and neural network activity. Subjective improvement in concentration, memory, sleep quality and decreased anxiety indicate improved neuroplasticity and functional brain state.

Conclusion. The obtained data demonstrate the IHT potential, as it can increase brain stress-resistance, and improve the adaptive capabilities of the central nervous system.

Key words: electroencephalogram, normobaric interval hypoxic training, functional brain activity, children aged 8–12.

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

Author contributions

Research concept and design: Ivanov A.B., Borukaeva I.Kh.

Literature search, participation in the study, data processing: Kipkeeva T.B., Shokueva A.G.

Statistical data processing: Iskandarova Yu.V., Nazhmudinova Z.Kh.

Data analysis and interpretation: Borukaeva I.Kh.

Text writing and editing: Borukaeva I.Kh., Ivanov A.B.

References

1. Boldyreva G.N., Zhavoronkova L.A., Sharova E.V. Mezhtsentral'nye otnosheniya EEG kak otrazhenie sistemnoy organizatsii mozga cheloveka v norme i pri patologii [Electroencephalographic intercentral interaction as a reflection of normal and pathological human brain activity]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti*. 2003; 33 (4): 391–401 (in Russian).
2. Bogolepov N.N., Fokin V.F. *Funktsional'naya mezhpolutsharnaya asimmetriya* [Functional interhemispheric asymmetry]. Moscow: Nauchnyy mir; 2004. 728 (in Russian).
3. Budkevich A.V., Ivanov L.B., Novikova G.R., Dzhannumova G.M. Vozrastnoe stanovlenie korkovoy ritmiki na EEG v zavisimosti ot formirovaniya individual'no-psikhologicheskikh osobennostey rebenka [Age development of cortical rhythmicity in the EEG depending on the formation of the child's personal psychical characteristics]. *Meditsinskiy al'favit*. 2019; 1 (8): 42–50. DOI: 10.33667/2078-5631-2019-1-8(383)-42-48 (in Russian).
4. Ivanov A.B., Borukaeva I.Kh., Abazova Z.Kh., Molov A.A., Kipkeeva T.B., Shokueva A.G., Shkhagumov K.Yu. Sravnitel'nyy analiz bioelektricheskoy aktivnosti i tsirkulyatornogo obespecheniya golovnogogo mozga u podrostkov pri ostroy gipoksii [Comparative analysis of brain bioelectrical activity and circulatory supply in adolescents with acute hypoxia]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskoy zhurnal*. 2022; 3: 86–97. DOI: 10.34014/2227-1848-2022-3-86-96 (in Russian).
5. Bakhtin O.M., Lazurenko D.M., Kirov V.N. *Fiziologicheskie osnovy bioelektricheskoy aktivnosti mozga* [Physiological bases of cerebral bioelectrical activity]. Ekaterinburg: Ural'skiy universitet; 2012. 256 (in Russian).
6. Ignatenko G.A., Maylyan E.A., Dubovaya A.V., Kaluga A.A., Goncharov A.N., Subbotina E.A. Obosnovanie primeneniya interval'noy gipoksiterapii v lechenii zhenshchin s autoimmunnym tireoiditom [Substantiation of interval hypoxic therapy for autoimmune thyroiditis treatment in women]. *Prakticheskaya meditsina*. 2023; 21 (2): 31–37. DOI: 10.32000/2072-1757-2023-2-68-72 (in Russian).
7. Borukaeva I.Kh., Abazova Z.Kh., Ivanov A.B., Shkhagumov K.Yu., Shavaeva F.V., Molov A.A., Kipkeeva T.B., Shokueva A.G. Preservation of the immunomodulatory effect of interval hypoxotherapy after coronavirus infection in the long-term period. *Medical Immunology (Russia)*. 2023; 25 (4): 809–814. DOI: 10.15789/1563-0625-POT-2767.
8. Borukaeva I.Kh., Abazova Z.Kh., Ivanov A.B., Shkhagumov K.Yu. Interval'naya gipoksiterapiya i enter'al'naya oksigenoterapiya v reabilitatsii patsientov s khronicheskoy obstruktivnoy bolezn'yu legkikh [The role of interval hypoxotherapy and enteral oxygen therapy in rehabilitation of patients with chronic obstructive pulmonary disease]. *Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury*. 2019; 2: 27–32. DOI: 10.17116/kurort20199602127 (in Russian).
9. Titova O.N., Kuzubova N.A., Lebedeva E.S. Rol' gipoksiynogo signal'nogo puti v adaptatsii kletok k gipoksii. RMZh [The role of the hypoxia signaling pathway in cellular adaptation to hypoxia]. *Meditsinskoe obozrenie*. 2020; 4 (4): 207–213. DOI: 10.32364/2587-6821-2020-4-4-207-213 (in Russian).
10. Balykin M.V., Sagidova S.A., Zharkov A.S., Ayzyatulova E.D., Pavlov D.A., Antipov I.V. Vliyanie pre-ryvistoy gipobaricheskoy gipoksii na ekspressiyu HIF-1A i morfofunktsional'nye izmeneniya v miokarde [Effect of intermittent hypobaric hypoxia on HIF-1A expression and morphofunctional changes in the myocardium]. *Ulyanovskiy mediko-biologicheskoy zhurnal*. 2017; 2: 125–134. DOI: 10.23648/UMBJ.2017.26.6227 (in Russian).
11. Soroko S.I., Bekshaev S.S., Sidorov Yu.A. *Osnovnye tipy mekhanizmov samoregulyatsii mozga* [Main types of brain self-regulation mechanisms]. Leningrad: Nauka; 1990. 205 (in Russian).
12. Bazanova O.M. *Al'fa-ritm mozga: Indikator funktsional'nogo sostoyaniya i neyrofiziologicheskogo rezerva* [Brain's Alpha-rhythm: Indicator of functional state and neurophysiological reserve]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo; 2010. 304 (in Russian).

13. Bulgakova O.S. Dinamika voln EEG pri razlichnykh funktsional'nykh sostoyaniyakh. Obzor issledovaniy rossiyskikh uchenykh (2000–2020) [Dynamics of EEG waves for various functional states. Review of research by Russian scientists (2000–2020)]. *Vestnik psikhofiziologii*. 2020; 4: 8–17 (in Russian).
14. Kuznetsova T.G., Gorbacheva M.V., Bulgakova O.S. Krosskorrelyatsionnyy analiz EEG i asimmetriya al'fa-ritma u detei 6-7 let pri dostizhenii tseli [Cross-correlation analysis of EEG and alpha rhythm asymmetry in 6-7-year-old children achieving a goal]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2015; 10 (5): 845–848. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7641> (accessed: February 03, 2025) (in Russian).
15. Korobeinikova I.I., Venerina Ya.A., Biryukova E.V., Karatygin N.A. Spektral'nye kharakteristiki al'fa-ritma EEG i vremennye parametry intellektual'noy deyatel'nosti [Spectral characteristics of EEG alpha rhythm and temporal parameters of intellectual activity]. *Psikhicheskoe zdorov'e*. 2018; 16 (6): 33–39. DOI: 10.25557/2074-014X.2018.06.33-39 (in Russian).
16. Kuzyaev A.E., Koekina O.I. Al'fa-strobirovanie sensorykh signalov mozga i sinestezii pri dominiruyushchem tipe vospriyatiya [Alpha-strobing of sensory signals of the brain and synesthesia in the dominant experience type]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2022; 11: 19–29. Available at: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=13462> (accessed: February 03, 2025). DOI: 10.17513/mjpf.13462 (in Russian).
17. Bondar' A.T., Boldyreva G.N. Vozrastnye osobennosti bioelektricheskoy aktivnosti mozga detey [Age-related characteristics of cerebral bioelectrical activity brain in children]. *Psikhofiziologiya*. 2003; 2: 123–129 (in Russian).
18. Luk'yanova L.D., Dudchenko A.M., Tsybina T.A., Germanova E.L., Tkachuk E.N., Erenburg I.V. Deystvie interval'noy normobaricheskoy gipoksii na kineticheskie svoystva mitokhondrial'nykh fermentov [Effect of interval normobaric hypoxia on the kinetic properties of mitochondrial enzymes]. *Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsiny*. 2007; 144 (12): 644 (in Russian).
19. Sazontova T.G., Bolotova A.V., Bedareva I.V., Kostina N.V., Arkhipenko Y.V. Adaptation to Intermittent Hypoxia/Hyperoxia Enhances Efficiency of Exercise Training. *Intermittent Hypoxia and Human Diseases*. 2012; 16: 191–205. DOI: 10.1007/978-1-4471-2906-6_16.
20. Pugh C.W., Ratcliffe P.J. New horizons in hypoxia signaling pathways. *Experimental Cell Research*. 2017; 356: 116–121. DOI: 10.1016/j.yexcr.2017.03.008.

Received January 19, 2025; accepted February 21, 2025.

Information about the authors

Ivanov Anatoliy Betalovich, Doctor of Sciences (Biology), Professor, Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173; e-mail: abivanov@rambler.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-167X>.

Borukaeva Irina Khasanbievna, Doctor of Sciences (Medicine), Head of the Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173; e-mail: irborukaeva@yandex.ru, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-1180-228X>.

Kipkeeva Tat'yana Borisovna, Senior Lecturer, Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173; e-mail: kipkeevatat'yana70@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-0995>.

Shokueva Asiyat Gisaevna, Senior Lecturer, Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173; e-mail: schokueva@yandex.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3540-119X>.

Iskandarova Yuliya Vladislavovna, Teaching Assistant, Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky St., 173; e-mail: juliaa-1994@mail.ru, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9629-4968>.

Nazhmudinova Zalina Khalidovna, Teaching Assistant, Chair of Normal and Pathological Human Physiology, Medical Academy, Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. 360000, Russia, Nalchik, Chernyshevsky str., 173; e-mail: zalinanazhmutdinova@icloud.com, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-1264-3787>.

For citation

Ivanov A.B., Borukaeva I.Kh., Kipkeeva T.B., Shokueva A.G., Iskandarova Yu.V., Nazhmudinova Z.Kh. *Izmenenie bioelektricheskoy aktivnosti kory golovnogo mozga detey 8–12 let posle interval'noy gipoksicheskoy trenirovki* [Changes in bioelectrical activity of the cerebral cortex in children aged 8–12 after interval hypoxic training]. *Ul'yanovskiy mediko-biologicheskij zhurnal*. 2025; 1: 68–79. DOI: 10.34014/2227-1848-2025-1-68-79 (in Russian).