Дата публикации: 01.06.2026
DOI: 10.24412/2588-0500-2026_10_02_17
УДК 616-092.19:57.043

Publication date: 01.06.2026
DOI: 10.24412/2588-0500-2026_10_02_17
UDC 616-092.19:57.043

АДАПТАЦИОННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКИ КИСЛОРОДНОГО СТАТУСА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ У СТУДЕНТОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТОГЕОГРАФИЧЕСКИХ ГРУПП ПРИ НОРМОБАРИЧЕСКОЙ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ГИПОКСИТЕРАПИИ

А.Г. Шокуева, И.Х. Борукаева, Ф.В. Шаваева, А.А. Молов, Т.Х. Агнокова
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова», г. Нальчик, Россия

Аннотация. ***Введение.*** Климатогеографические условия определяют особенности адаптационных реакций на гипоксию. Цель: оценить динамику кислородного статуса и функциональных резервов у студентов разных климатогеографических групп при курсовой нормобарической интервальной гипоксии. ***Методы.*** Обследован 261 студент (22,4±0,4 года): жители среднегорья (n=127) и низменности (n=134). До и после 15-дневного курса гипоксической тренировки оценивали сатурацию, вариабельность сердечного ритма, гемоглобин, ферритин, интегральные индексы функциональных резервов и гипоксической устойчивости. ***Результаты.*** Острая гипоксия вызывала десатурацию и активацию симпатической регуляции в обеих группах, менее выраженную у жителей среднегорья. После курса отмечены снижение частоты сердечных сокращений, усиление парасимпатических влияний, повышение гемоглобина и ферритина, а также рост интегральных показателей. У студентов низменной группы формировались компенсаторные механизмы, тогда как у жителей среднегорья эффекты реализовывались на фоне исходной адаптации. ***Заключение.*** Курсовое воздействие нормобарической интервальной гипоксии приводит к системным адаптационным перестройкам кислородного статуса, вегетативной регуляции и функциональных резервов у студентов различных климатогеографических групп.
Ключевые слова: нормобарическая интервальная гипоксия, функциональные резервы, кислородный статус, вариабельность сердечного ритма, адаптация, климатогеографические условия, студенты.

ADAPTIVE CHANGES IN OXYGEN STATUS AND FUNCTIONAL RESERVES IN STUDENTS FROM DIFFERENT CLIMATIC-GEOGRAPHICAL GROUPS FOLLOWING A COURSE OF NORMOBARIC INTERMITTENT HYPOXIA

A.G. Shokueva, I.Kh. Borukaeva, F.V. Shavaeva, A.A. Molov, T.Kh. Agnokova
Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

Abstract. ***Introduction.*** Climatic and geographical conditions determine the peculiarities of adaptive responses to hypoxia. Objective: to assess the dynamics of oxygen status and functional reserves in students from different climatic-geographical groups following a course of normobaric intermittent hypoxia. ***Methods.*** A total of 261 students (22.4±0.4 years) were examined: mid-altitude residents (n=127) and lowland residents (n=134). Before and after a 15-day course of hypoxic training, arterial oxygen saturation, heart rate variability, hemoglobin, ferritin, and integral indices of functional reserves and hypoxic resistance were evaluated. ***Results.*** Acute hypoxia induced oxygen desaturation and activation of sympathetic regulation in both groups, with less pronounced responses in mid-altitude residents. After the training course, a decrease in heart rate, enhancement of parasympathetic activity, increased hemoglobin and ferritin levels, and growth of integral indices were observed. In lowland students, compensatory mechanisms were formed, whereas in mid-altitude residents the effects were realized against the background of pre-existing adaptation. ***Conclusion***. Application of the course of normobaric intermittent hypoxia leads to systemic adaptive rearrangements of oxygen status, autonomic regulation and functional reserves of students from different climatic-geographical groups.
Keywords: normobaric intermittent hypoxia, functional reserves, oxygen status, heart rate variability, adaptation, climatic-geographical conditions, students.

Введение. В последние годы в физиологии человека и адаптационной медицине отмечается устойчивый рост интереса к проблеме функциональных резервов организма у лиц молодого возраста, что обусловлено увеличением когнитивных,

психоэмоциональных и учебно-профессиональных нагрузок [1]. По данным Всемирной организации здоровья, до 35-45% студентов медицинских и естественно-научных специальностей демонстрируют признаки функционального перенапряжения регуляторных систем уже на этапе обучения, включая снижение вариабельности сердечного ритма (ВСР), повышение симпатической активности и уменьшение адаптационного потенциала сердечно-сосудистой системы [2]. Аналогичные данные приводятся в обзорах Н.А. Агаджаняна (2021) [3] и Ф.З. Меерсона (2020) [4], где подчеркивается, что функциональные резервы у молодых лиц являются лимитирующим звеном устойчивости к стрессорным и экстремальным воздействиям.

Гипоксия в современной физиологии рассматривается как один из наиболее универсальных стресс-факторов, обладающих выраженным адаптогенным потенциалом [5]. Снижение парциального давления кислорода инициирует многоуровневый каскад компенсаторно-приспособительных реакций, включающих перестройку кислородного транспорта, активацию гипоксия-индуцируемых факторов транскрипции и оптимизацию энергетического обмена [6]. При этом физиологический эффект гипоксии определяется не только ее выраженностью, но и режимом воздействия. В этом контексте особое значение приобрела нормобарическая интервальная гипоксия как управляемая модель повторяющегося гипоксического стресса. Согласно систематическому обзору G.S. Panza и соавт. (2023) [6], интервальная гипоксия при правильно подобранных параметрах способствует формированию адаптационных перестроек без развития стойкой дезадаптации и структурных повреждений тканей. Авторы указывают, что повторяющиеся кратковременные эпизоды гипоксии запускают феномен гипоксического прекондиционирования, сопровождающийся снижением избыточной симпатоадреналовой активации и повышением экономичности кардиореспираторной регуляции.

В то же время многочисленные исследования подчеркивают высокую вариабельность индивидуальных физиологических ответов на идентичные гипоксические стимулы. По данным J. Burtscher и соавт. (2023), различия в динамике показателей кислородного статуса, гемодинамики и вегетативной регуляции при интервальной гипоксии во многом определяются исходным уровнем функциональных резервов и адаптационным анамнезом обследуемых [7]. Одним из ключевых, но недостаточно изученных модификаторов гипоксической адаптации остаются климатогеографические условия длительного проживания. Известно, что формирование организма в условиях высокогорья сопровождается хроническим воздействием гипобарической гипоксии и приводит к устойчивым изменениям кардиореспираторной регуляции, кислородтранспортной функции крови и вегетативного баланса. По данным J.C. Tremblay и P.N. Ainslie (2021), у лиц, длительно проживающих на высоте, формируются специфические стратегии адаптации, отличающиеся по вкладу вентиляционных, гемодинамических и гемато-транспортных механизмов [8].

Межпопуляционные исследования показывают, что устойчивость к гипоксии может реализовываться по различным физиологическим сценариям. J.F. Storz и G.R. Scott (2021) отмечают, что даже при сходных внешних условиях гипоксического воздействия адаптационные ответы существенно различаются в зависимости от климатогеографического и онтогенетического фона [9]. Однако большинство экспериментальных работ по интервальной гипоксии либо не стратифицируют обследуемых по условиям формирования организма, либо ограничиваются анализом отдельных физиологических показателей без интегративной оценки функциональных резервов. По данным M. Paw, показатели ВСР являются высокочувствительными маркерами экономичности и устойчивости адаптации к гипоксическому стрессу [10]. Снижение соотношения мощности низкочастотного и высокочастотного компонентов ВСР (LF/HF) и рост временных показателей ВСР рассматриваются как признаки формирования благоприятного адаптационного профиля, однако влияние климатогеографических факторов на эти

процессы при курсовой интервальной гипоксии остается недостаточно изученным.

Несмотря на значительный массив данных о физиологических эффектах нормобарической интервальной гипоксии сохраняется дефицит исследований, направленных на сравнительный анализ адаптационных перестроек кислородного статуса и функциональных резервов с учетом климатогеографических условий формирования организма.

Цель исследования – изучить динамику показателей кислородного статуса и функциональных резервов у студентов различных климатогеографических групп в условиях курсового применения нормобарической интервальной гипоксии.

Методы и организация исследования. Исследование выполнено как проспективное сравнительное физиологическое наблюдение, направленное на изучение адаптационных перестроек кислородного статуса и функциональных резервов организма при курсовом воздействии нормобарической интервальной гипоксии с учетом климатогеографических условий формирования обследуемых.

В исследовании приняли участие 261 студент Медицинской академии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, обучающиеся по программам высшего медицинского образования, в возрасте 22,4±0,4 года. Обследуемые были распределены на две группы: I группа (n=127) – жители высокогорья (постоянное проживание на высоте около 1 300 м над уровнем моря); II группа (n=134) – студенты, проживающие в условиях низменного климата (высота – 70-230 м над уровнем моря).

Все участники являлись здоровыми, не имели в анамнезе хронических заболеваний сердечно-сосудистой, дыхательной и эндокринной систем, острых воспалительных процессов на момент обследования и не принимали лекарственных препаратов, влияющих на кардиореспираторную или вегетативную регуляцию.

Критериями включения являлись: возраст – 20-25 лет, постоянное проживание в соответствующих климатогеографических условиях не менее 5 лет, добровольное информированное согласие на участие в исследовании.

Критериями исключения являлись: наличие хронических соматических заболеваний, анемий, нарушений ритма сердца, острых заболеваний в период исследования, а также несоблюдение протокола гипоксического воздействия.

Протокол исследования. Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе выполнялась исходная оценка функционального состояния обследуемых, включающая регистрацию показателей кислородного статуса, гемодинамики, ВСР и кислородтранспортной функции крови. На втором этапе проводился курс нормобарической интервальной гипоксической тренировки продолжительностью 15 дней. На третьем этапе осуществлялась повторная комплексная оценка изучаемых показателей с целью анализа динамики адаптационных перестроек.

Методы гипоксического воздействия. Нормобарическая интервальная гипоксическая тренировка (ИГТ) проводилась в условиях нормального атмосферного давления с использованием стандартизированного гипоксического протокола, предусматривающего чередование фаз гипоксии (12% O_2, 11% O_2 и 10% O_2) и нормоксии (20,9% O_2) в циклическом режиме на гипоксикаторе «OXYTERRA» (Россия). Параметры гипоксического воздействия подбирались индивидуально на основании предварительной гипоксической пробы для обеспечения физиологической адекватности и безопасности нагрузки. Курс включал ежедневные сеансы гипоксического воздействия в течение 15 последовательных дней.

Методы физиологического исследования. Оценка кислородного статуса проводилась путем регистрации сатурации артериальной крови кислородом (SaO_2) в покое пульсоксиметром «B.WELL Med-325». Гемодинамическое состояние оценивали по показателям частоты сердечных сокращений (ЧСС) и систолического артериального давления (САД) монитором артериального давления «Picoос X1 Pro» (Россия), регистрируемых в стандартных условиях после периода адаптации к положению тела.

Вегетативная регуляция сердечной деятельности анализировалась методом ВСР с расчетом временных и спектральных показателей, включая стандартное отклонение нормальных (NN) интервалов сердечного ритма (SDNN), квадратный корень из среднего квадрата разностей последовательных NN-интервалов (RMSSD) и соотношение LF/HF как интегральный показатель вегетативного баланса на компьютерном комплексе для исследования вегетативной нервной системы «ВНС-Спектр» (Россия).

Лабораторные методы. Для оценки кислородтранспортной функции крови определяли концентрацию гемоглобина на автоматическом гематологическом анализаторе «MicroCC-20Plys» (Россия) и уровень ферритина в венозной крови методом количественного иммуноферментного анализа (ИФА) на аппарате «Mindray CL-1200i» (Китай) по «сэндвич»-схеме в 96-луночном формате с использованием набора реагентов «ИФА-ферритин» (Россия). Лабораторные исследования выполнялись на базе Университетской клиники Кабардино-Балкарского государственного университета. Для комплексной оценки адаптационных возможностей рассчитывались интегральный индекс функциональных резервов и интегральный индекс гипоксической устойчивости, формируемые на основе совокупности физиологических и вегетативных показателей. Использование интегральных индексов позволило оценить системный характер адаптационных перестроек и сопоставить выраженность эффектов между климатогеографическими группами.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием пакета IBM SPSS Statistics 27.0. Количественные показатели представлены в виде среднего значения и стандартного отклонения (M±σ). Нормальность распределения проверялась с использованием критерия Шапиро-Уилка. Для оценки межгрупповых различий применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок, для анализа внутригрупповой динамики – парный t-критерий Стьюдента. Уровень статистической значимости принимался равным $p<0,05$.

Исследование выполнено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации. Все участники были проинформированы о целях и методах исследования и подписали добровольное информированное согласие. Протокол исследования одобрен локальным этическим комитетом Кабардино-Балкарского государственного университета (протокол № 23/06 от 12.10.2025 г.).

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ исходных показателей функционального состояния организма показал, что по большинству базовых параметров группы были сопоставимы. Так, уровень SaO_2, ЧСС и САД статистически значимо не различались между группами ($p>0,05$), что свидетельствует об отсутствии исходных различий в оксигенации и системной гемодинамике (табл. 1).

Анализ показателей вариабельности сердечного ритма выявил достоверные межгрупповые различия. Во II группе отмечались более высокие значения SDNN и RMSSD по сравнению с I группой, что указывает на более выраженную общую вариабельность ритма и усиление парасимпатического влияния на синусовый узел. При этом отношение LF/HF статистически значимо не различалось между группами ($p>0,05$), что говорит об отсутствии выраженного смещения симпато-вагального баланса на уровне спектрального анализа.

Гематологические показатели – уровень гемоглобина и ферритина – также не имели достоверных межгрупповых различий ($p>0,05$), что позволяет исключить влияние различий кислородтранспортной функции крови и запасов железа на дальнейшие результаты исследования.

В то же время интегральные показатели функционального состояния имели статистически значимые различия. Значения интегрального индекса функционального резерва (ИИФР) и интегрального индекса гипоксической устойчивости (ИИГУ) были достоверно выше в I группе по сравнению со II группой ($p<0,05$), что указывает на более высокий уровень функциональных резервов и устойчивости к гипоксическому воздействию у пациентов I группы на исходном этапе исследования.

Анализ показателей вариабельности сердечного ритма выявил достоверные

межгрупповые различия. Во II группе отмечались более высокие значения SDNN и RMSSD по сравнению с I группой, что указывает на более выраженную общую вариабельность ритма и усиление парасимпатического влияния на синусовый узел. При этом отношение LF/HF статистически значимо не различалось между группами (p>0,05), что говорит об отсутствии выраженного смещения симпато-вагального баланса на уровне спектрального анализа.

Таблица 1

Исходные показатели кислородного статуса, гемодинамики, вариабельности сердечного ритма и функциональных резервов у студентов различных климатогеографических групп, M±σ

Показатель	I группа (n=127)	II группа (n=134)	P<
SaO_2, %	97,0±0,9	98,1±0,7	–
ЧСС, уд/мин	72,8±7,1	69,9±6,6	–
САД, мм рт. ст.	117,6±8,9	115,1±8,4	–
SDNN, мс	56,4±1,3	61,9±1,4	0,05
RMSSD, мс	39,8±1,6	44,7±1,3	0,05
LF/HF	1,32±0,18	1,05±0,11	–
Hb, г/л	146,2±8,7	139,8±7,9	–
Ферритин, нг/мл	52,6±14,3	49,1±13,7	–
ИИФР, усл.ед.	0,69±0,04	0,55±0,03	0,05
ИИГУ, усл.ед.	0,68±0,06	0,52±0,05	0,05

Примечание: SaO_2 – сатурация артериальной крови кислородом; ЧСС – частота сердечных сокращений; САД – систолическое артериальное давление; SDNN – стандартное отклонение нормальных (NN) интервалов сердечного ритма; RMSSD – квадратный корень из среднего квадрата разностей последовательных NN-интервалов; LF/HF – соотношение мощности низкочастотного и высокочастотного компонентов вариабельности сердечного ритма, отражающее вегетативный баланс; Hb – концентрация гемоглобина в крови; ИИФР – интегральный индекс функциональных резервов; ИИГУ – интегральный индекс гипоксической устойчивости. Межгрупповые различия оценивались с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок.

Гематологические показатели – уровень гемоглобина и ферритина – также не имели достоверных межгрупповых различий (p>0,05), что позволяет исключить влияние различий кислородтранспортной функции крови и запасов железа на дальнейшие результаты исследования.

В то же время интегральные показатели функционального состояния имели статистически значимые различия. Значения интегрального индекса функционального резерва (ИИФР) и интегрального индекса гипоксической устойчивости (ИИГУ) были достоверно выше в I группе по сравнению со II группой (p<0,05), что указывает на более высокий уровень функциональных резервов и устойчивости к гипоксическому воздействию у пациентов I группы на исходном этапе исследования.

Полученные данные отражают наличие исходных различий в уровне функциональных резервов и устойчивости к гипоксическому воздействию у студентов, сформировавшихся в различных климато-географических условиях.

Анализ физиологических изменений, возникающих в ответ на воздействие острой гипоксии (10% O_2), выявил выраженные межгрупповые различия по показателям кислородного статуса, гемодинамики и вегетативной регуляции сердечного ритма (табл. 2).

Таблица 2

Изменения показателей кислородного статуса, гемодинамики, вегетативной регуляции при воздействии острой гипоксии у студентов различных климатогеографических групп, M±σ

Показатель	I группа	II группа	P<
ΔSaO_2, %	−3,2±0,2	−4,8±0,3	0,05
ΔЧСС, уд/мин	+5,6±0,8	+10,8±0,1	0,05
ΔСАД, мм рт. ст.	+3,1±0,2	+6,3±0,1	0,05
ΔSDNN, мс	−4,4±4,9	−7,6±4,1	0,05
ΔRMSSD, мс	−4,2±0,7	−6,9±0,2	0,05
ΔLF/HF	+0,13±0,04	+0,17±0,02	0,05

Примечание: Δ – изменение показателя относительно исходного уровня; SaO_2 – сатурация артериальной крови кислородом; ЧСС – частота сердечных сокращений; САД – систолическое артериальное давление; SDNN – стандартное отклонение нормальных (NN) интервалов сердечного ритма; RMSSD – квадратный корень из среднего квадрата разностей последовательных NN-интервалов; LF/HF – соотношение мощности низкочастотного и высокочастотного компонентов вариабельности сердечного ритма, отражающее вегетативный баланс. Межгрупповые различия оценивались с использованием t-критерия Стьюдента для независимых выборок.

В обеих климатогеографических группах острое гипоксическое воздействие сопровождалось снижением сатурации артериальной крови кислородом, однако величина десатурации была статистически значимо ниже у студентов, проживающих в горах, по сравнению со студентами второй группы группы (3,2±0,2% и 4,8±0,3% соответственно; p<0,05). ЧСС в ответ на острое гипоксическое воздействие увеличивалась в обеих группах, при этом прирост ЧСС был более выраженным у студентов II группы (10,8±0,1 уд/мин) по сравнению с I группой (5,6±0,8 уд/мин; p<0,05). Аналогичная направленность различий отмечалась и по показателям гемодинамики: повышение уровня САД у студентов высокогорной группы составило 3,1±0,2 мм рт. ст., тогда как у студентов, проживающих в условиях равнинной местности, 6,3±0,1 мм рт. ст. (p<0,05). Оценка изменений ВСР показала снижение временных показателей ВСР в обеих группах. Значение SDNN уменьшалось на 4,4±4,9 мс у студентов I группы и на 7,6±4,1 мс у студентов II группы (p<0,05). Схожая динамика выявлена и по показателю RMSSD, отражающему парасимпатическую активность: снижение составило 4,2±0,7 мс в I группе и 6,9±0,2 мс во II группе (p<0,05). Соотношение LF/HF в ответ на острое гипоксическое воздействие возрастало в обеих группах, что отражало усиление симпатических влияний в регуляции сердечного ритма. При этом прирост показателя был статистически значимо выше у студентов, проживающих на низменности (0,17±0,02), по сравнению со студентами высокогорной группы (0,13±0,04; p<0,05).

Анализ показателей после завершения 15-дневного курса нормобарической интервальной гипоксической тренировки продемонстрировал положительную динамику кислородного статуса, гемодинамики, вегетативной регуляции сердечного ритма, кислородтранспортной функции крови и интегральных функциональных резервов у студентов обеих климатогеографических групп при сохранении статистически значимых межгрупповых различий по ряду параметров.

После завершения курса уровень сатурации артериальной крови кислородом увеличился в обеих группах, при этом у студентов, проживающих в горах, значение SaO_2 составило 98,8±0,8%, а у студентов II группы – 98,5±0,6% (p>0,05) (табл. 3).

Анализ показателей функционального состояния организма у обследуемых I и II групп выявил ряд адаптационных изменений после проведения курса интервальной гипокситерапии. Уровень насыщения SaO_2 в обеих группах после ИГТ достоверно не изменился (p>0,05). В I группе показатель увеличился с 97,0±0,9% до 98,8±0,8%, во II

группе – с 98,1±0,7% до 98,5±0,6%. Отсутствие статистической значимости свидетельствует о стабильности процессов газообмена и достаточной исходной оксигенации у обследуемых.

В I группе после ИГТ отмечено достоверное снижение ЧСС с 72,8±2,1 до 66,1±2,4 уд/мин ($p<0,05$), что отражает повышение экономичности сердечной деятельности. Во II группе снижение ЧСС (с 69,9±1,6 до 68,2±2,1 уд/мин) статистически значимым не было ($p>0,05$).

САД в обеих группах продемонстрировало тенденцию к снижению (I группа: 117,6±4,9 → 114,3±3,1 мм рт. ст.; II группа: 115,1±4,4 → 113,2±3,9 мм рт. ст.), однако различия не достигли статистической значимости ($p>0,05$).

Таблица 3

Динамика показателей кислородного статуса, гемодинамики, вариабельности сердечного ритма, кислородтранспортной функции крови и интегральных функциональных резервов после 15-дневного курса нормобарической интервальной гипоксической тренировки, M±σ

Показатель	I группа		II группа		P
	До ИГТ	После ИГТ	До ИГТ	После ИГТ	
SaO_2 %	97,0±0,9	98,8±0,8	98,1±0,7	98,5±0,6	$p^1>0,05$ $p^2>0,05$
ЧСС, уд/мин	72,8±2,1	66,1±2,4	69,9±1,6	68,2±2,1	$p^1<0,05$ $p^2>0,05$
САД, мм рт. ст.	117,6±4,9	114,3±3,1	115,1±4,4	113,2±5,9	$p^1>0,05$ $p^2>0,05$
SDNN, мс	56,4±2,3	61,8±2,5	61,9±1,4	63,9±2,3	$p^1<0,05$ $p^2>0,05$
RMSSD, мс	39,8±2,6	47,6±2,8	44,7±1,3	46,6±2,4	$p^1<0,05$ $p^2>0,05$
LF/HF	1,32±0,13	1,15±0,14	1,05±0,11	0,62±0,13	$p^1<0,05$ $p^2<0,05$
Hb, г/л	146,2±2,1	152,9±2,4	139,8±2,2	146,6±2,6	$p^1<0,05$ $p^2<0,05$
Ферритин, нг/мл	52,6±1,3	59,9±1,8	49,1±1,7	56,8±1,1	$p^1<0,05$ $p^2<0,05$
ИИФР, усл.ед.	0,69±0,02	0,74±0,02	0,55±0,03	0,61±0,02	$p^1<0,05$ $p^2<0,05$
ИИГУ, усл.ед.	0,68±0,02	0,75±0,02	0,52±0,02	0,59±0,02	$p^1<0,05$ $p^2<0,05$

Примечание: ИГТ – интервальная гипоксическая тренировка; SaO_2 – сатурация артериальной крови кислородом; ЧСС – частота сердечных сокращений; САД – систолическое артериальное давление; SDNN – стандартное отклонение нормальных (NN) интервалов сердечного ритма; RMSSD – квадратный корень из среднего квадрата разностей последовательных NN-интервалов; LF/HF – соотношение мощности низкочастотного и высокочастотного компонентов вариабельности сердечного ритма, отражающее вегетативный баланс; Hb – концентрация гемоглобина в крови; ИИФР – интегральный индекс функциональных резервов; ИИГУ – интегральный индекс гипоксической устойчивости. Для межгрупповых сравнений применялся t-критерий Стьюдента для независимых выборок, для оценки внутригрупповой динамики – парный t-критерий Стьюдента.

У жителей высокогорья отмечено достоверное увеличение SDNN (56,4±2,3 → 61,8±2,5 мс; $p<0,05$) и RMSSD (39,8±2,6 → 47,6±2,8 мс; $p<0,05$), что свидетельствует об усилении парасимпатических влияний и повышении адаптационных резервов автономной регуляции.

Во II группе увеличение SDNN и RMSSD носило характер тенденции и статистически значимым не было ($p>0,05$).

После курса интервальной гипокситерапии в обеих группах отмечено достоверное снижение показателя LF/HF, отражающего симпато-вагальный баланс автономной нервной системы (p_1<0,05; p_2<0,05). В I группе значение LF/HF снизилось с 1,32±0,13 до 1,15±0,14, что свидетельствует о тенденции к уменьшению относительного симпатического влияния и усилению парасимпатической регуляции.

Во II группе снижение носило более выраженный характер, что указывает на существенное смещение в сторону вагусной доминанты.

После курса ИГТ в обеих группах зарегистрировано достоверное повышение уровня гемоглобина (I группа: 146,2±4,7 → 152,9±3,4 г/л; II группа: 139,8±3,9 → 146,6±4,6 г/л; p<0,05) и ферритина (I группа: 52,6±3 → 59,9 ± 1,8 нг/мл; II группа: 49,1±1,7 → 56,8±1,1 нг/мл; p<0,05).

Полученные данные свидетельствуют об активации эритропоэза и усилении железообмена как одного из ключевых механизмов гипоксической адаптации.

После курса интервальной гипокситерапии в обеих группах отмечено достоверное повышение интегральных показателей функционального состояния организма (p_1<0,05; p_2<0,05). В I группе ИИФР увеличился с 0,69±0,02 до 0,74±0,02 усл.ед., что свидетельствует о нарастании функциональных возможностей регуляторных систем и повышении общей адаптационной устойчивости организма.

Во II группе (жители низменной местности) также зарегистрирован достоверный рост показателя – с 0,55±0,02 до 0,61±0,03 усл.ед. Несмотря на более низкие исходные значения динамика отражает активацию компенсаторных механизмов и расширение функционального резерва под влиянием гипоксической тренировки.

Аналогичная тенденция выявлена и для ИИГУ. В I группе показатель повысился с 0,68±0,02 до 0,75±0,02 усл.ед., что указывает на усиление толерантности к гипоксическому воздействию и оптимизацию кислородтранспортных и метаболических механизмов адаптации.

Во II группе ИИГУ достоверно увеличился с 0,52±0,02 до 0,59±0,03 усл.ед., отражая формирование более устойчивого гипоксического фенотипа у лиц, ранее не находившихся в условиях хронической природной гипоксии.

Таким образом, интервальная гипокситерапия способствовала достоверному росту как функциональных резервов, так и гипоксической устойчивости в обеих группах. При этом у жителей горной местности прирост показателей реализуется на фоне уже сформированной долговременной адаптации к гипоксии, тогда как у жителей, проживающих на низменности, он отражает индукцию и активное формирование компенсаторных механизмов.

Полученные результаты подтверждают представление о нормобарической интервальной гипоксии как о физиологически адекватном адаптационном воздействии, инициирующем системные перестройки кислородного транспорта, вегетативной регуляции и функциональных резервов организма. В то же время выявленные межгрупповые различия указывают на существенную роль климатогеографических условий формирования организма в определении характера и выраженности адаптационного ответа.

Снижение сатурации артериальной крови кислородом и рост ЧСС при остром гипоксическом воздействии, выявленные в настоящем исследовании, соответствуют классическим представлениям о срочной фазе гипоксической адаптации. Н.А. Агаджанян [3] и Ф.З. Меерсон [4] подчеркивали, что первичный ответ на гипоксию реализуется через активацию кардиореспираторных механизмов компенсации, направленных на поддержание доставки кислорода к жизненно важным органам. Острое гипоксическое воздействие вызывало системную реакцию со стороны кардиореспираторной и вегетативной регуляций у студентов обеих климатогеографических групп, проявлявшихся снижением сатурации артериальной крови кислородом, активацией сердечно-сосудистой системы и сдвигом автономного баланса в сторону симпатического звена. Вместе с тем характер и выраженность данных реакций существенно различались в зависимости от условий долговременной адаптации к гипоксии.

У студентов высокогорной группы отмечались менее выраженная десатурация, меньший прирост ЧСС и САД, а также более умеренное снижение временных показателей ВСР и меньший рост отношения LF/HF. Данные особенности указывают на более экономичную и устойчивую регуляторную реакцию, отражающую сформированную гипоксическую толерантность и более высокий уровень функциональных резервов автономной нервной системы.

Напротив, у студентов, проживающих на низменности, гипоксическое воздействие сопровождалось более выраженной активацией симпатического звена, снижением парасимпатической активности и усилением гемодинамического ответа, что свидетельствует о меньшей устойчивости регуляторных механизмов к острому дефициту кислорода. В совокупности полученные данные подтверждают ключевую роль климатогеографической адаптации в формировании индивидуальной чувствительности к гипоксии и определяют вегетативные и гемодинамические механизмы как важные патогенетические мишени при оценке гипоксической устойчивости. Аналогичные реакции описаны M. Paw [10], который рассматривал снижение временных показателей ВСР как маркер мобилизации регуляторных систем в условиях острого стрессорного воздействия.

После завершения 15-дневного курса интервальной гипоксической тренировки в обеих группах наблюдались повышение уровня SaO_2, снижение ЧСС в покое и рост временных показателей ВСР что свидетельствует о формировании более экономичного режима регуляции. Эти данные согласуются с результатами G.S. Panza и соавторов, показавших, что курсовая интервальная гипоксия способствует снижению избыточной симпатоадреналовой активности и оптимизации кардиореспираторной регуляции у условно здоровых лиц [6].

Сравнительный анализ показал, что у студентов, сформировавшихся в условиях среднегорья, адаптационные изменения носили более выраженный и согласованный характер. Более высокий прирост SDNN и RMSSD, а также более выраженное снижение соотношения LF/HF после курса у данной группы соответствуют данным J. Burtscher, который указывал, что эффективность гипоксического прекондиционирования в значительной степени определяется исходным уровнем функциональных резервов и степенью автономной пластичности [7]. У лиц с длительным анамнезом проживания в условиях гипоксии адаптация может реализовываться преимущественно по компенсаторному типу с сохранением элементов регуляторного напряжения.

Изменения показателей кислородтранспортной функции крови после курса гипоксической тренировки характеризовались умеренным повышением концентрации гемоглобина. Полученные данные согласуются с концепцией дозозависимого эритропоэтического ответа, описанной G.L. Semenza, согласно которой кратковременные и повторяющиеся гипоксические стимулы активируют эритропоэз без истощения депо железа [11]. Отсутствие межгрупповых различий по величине прироста гемоглобина указывает на универсальность данного механизма вне зависимости от климатогеографических условий формирования организма. Более высокие значения ИИФР и ИИГУ у студентов, проживающих в горах, как исходно, так и после курса гипоксического воздействия, согласуются с работами J.C. Tremblay и P.N. Ainslie, которые подчеркивали, что адаптация к гипоксии может реализовываться по различным физиологическим стратегиям, не всегда обеспечивающим оптимальную экономичность регуляции [8]. В нашем исследовании это проявлялось сохранением более высоких интегральных показателей у студентов высокогорной группы даже после курса гипоксической тренировки.

Сопоставление полученных данных с результатами отечественных и зарубежных исследований позволяет заключить, что нормобарическая интервальная гипоксия вызывает системные адаптационные перестройки у студентов независимо от климатогеографического происхождения. Вместе с тем характер этих перестроек определяется исходным адаптационным фоном: у студентов высокогорной группы формируется преимущественно экономичный тип регуляции с ростом функциональных

резервов, тогда как у студентов, проживающих на низменности, адаптация сопровождается большим регуляторным напряжением. Эти особенности необходимо учитывать при интерпретации физиологических эффектов гипоксических воздействий и разработке индивидуализированных программ гипоксической тренировки.

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что курсовое воздействие нормобарической интервальной гипоксии сопровождается формированием системных адаптационных перестроек кислородного статуса, вегетативной регуляции и функциональных резервов у студентов различных климатогеографических групп. При этом выраженность и структура адаптационного ответа определяются исходными климатогеографическими условиями формирования организма, что проявляется различиями в характере срочных реакций и долговременных адаптационных эффектов. Выявленные особенности адаптации обосновывают целесообразность дифференцированного и индивидуализированного применения программ нормобарической интервальной гипоксической тренировки с учетом исходного функционального состояния и адаптационного фона обучающихся, что имеет практическое значение для образовательной, спортивной и медико-реабилитационной практики.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке внутреннего гранта ФГБОУ ВО КБГУ им. Х.М. Бербекова, договор № 49 и программы развития «ПРИОРИТЕТ-2030».

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

Financing. This work was supported by an internal grant from the Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, agreement No. 49, and the PRIORITY-2030 development program.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цирканнуальные вариации парциальной плотности кислорода в зависимости от уровня солнечной активности и климатического пояса / О.Н. Рагозин, L. Muthelo, Е.Ю. Шаламова [и др.] // Экология человека. – 2025. – Т. 32. – № 1. – С. 32-41. DOI: 10.17816/humeco64866.
2. Влияние однократной интервальной гипоксической стимуляции на когнитивные функции здоровых добровольцев / А.С. Михалищина, Э.Д. Загайный, Я.В. Васина, О.С. Глазачев // Вестник психофизиологии. – 2023. – № 4. – С. 86-95. DOI: 10.34985/d2699-5404-1619-b.
3. Агаджанян, Н.А. Адаптация человека к гипоксии и гиперкапнии / Н.А. Агаджанян. – М.: ГЭОТАР-Media, 2021. – 304 с.
4. Меерсон, Ф.З. Адаптация, стресс и профилактика / Ф.З. Меерсон. – М.: Наука, 2020. – 312 с.
5. Ward, Milledge and West's high altitude medicine and physiology / A.M. Luks, P.N. Ainslie, J.S. Lawley [et al.] // Boca Raton, FL: CRC Press. – 2020. DOI: 10.1201/9780429444333.
6. Panza, G.S. Intermittent hypoxia: A call for harmonization in terminology / G.S. Panza, J. Burtscher, F. Zhao // Journal of Applied Physiology. – 2023. – Vol. 135. – No. 4. – P. 886-890. DOI: 10.1152/japplphysiol.00458.2023.
7. Mechanisms underlying the health benefits of intermittent hypoxia conditioning / J. Burtscher, T. Citherlet, A. Camacho-Cardenosa Wheatley [et al.] // The Journal of Physiology. – Vol. 602. – No. 21. – P. 5757-5783. DOI: 10.1113/JP285230.
8. Tremblay, J.C. Global and country-level estimates of human population at high altitude / J.C. Tremblay, P.N. Ainslie // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2021. – Vol. 118. – No. 18. – P. e2102463118. DOI: 10.1073/pnas.2102463118.
9. Storz, J.F. Phenotypic plasticity, genetic assimilation, and genetic compensation in hypoxia adaptation of high-altitude vertebrates / J.F. Storz, G.R. Scott // Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. – 2021. – Vol. 253. – P. 110865. DOI: 10.1016/j.cbpa.2020.110865.
10. Hypoxia enhances anti-fibrotic properties of extracellular vesicles derived from hiPSCs via the miR302b-3p/TGFβ/SMAD2 axis / M. Paw, A.A. Kusiak, K. Nit [et al.] // BMC Medicine. – 2023. – Vol. 21. – P. 412. DOI: 10.1186/s12916-023-03117-w.
11. Semenza, G.L. Oxygen sensing, hypoxia-inducible factors, and disease pathophysiology / G.L. Semenza // Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease. – 2014. – Vol. 9. – P. 47-71. DOI: 10.1146/annurev-pathol-012513-104720.

REFERENCES

1. Ragozin O.N., Muthelo L. et al. Circannual variations in partial oxygen density depending on solar activity level and climatic zone. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 2025, vol. 32, no. 1, pp. 32-41. DOI: 10.17816/humeco64866. (in Russ.)
2. Mikhalishchina A.S., Zagajnyj E.D., Vasina Ya.V., Glazachev O.S. Effect of single interval hypoxic

stimulation on cognitive functions of healthy volunteers. *Psychophysiology news*, 2023, no. 4, pp. 86-95. DOI: 10.34985/d2699-5404-1619-b. (in Russ.)
3. Agadzhanyan N.A. Human adaptation to hypoxia and hypercapnia. Moscow: GEOTAR-Media, 2021. 304 p. (in Russ.)
4. Meerson F.Z. Adaptation, stress and prevention. Moscow: Nauka, 2020. 312 p. (in Russ.)
5. Luks A.M., Ainslie P.N., Lawley J.S., Roach R.C., Simonson T.S. Ward, Milledge and West's high altitude medicine and physiology. Boca Raton, FL: CRC Press, 2020. DOI: 10.1201/9780429444333.
6. Panza G.S., Burtscher J., Zhao F. Intermittent hypoxia: A call for harmonization in terminology. *Journal of Applied Physiology*, 2023, vol. 135, no. 4, pp. 886-890. DOI: 10.1152/japplphysiol.00458.2023.
7. Burtscher J., Citherlet T., Camacho-Cardenosa A. et al. Mechanisms underlying the health benefits of intermittent hypoxia conditioning. *The Journal of Physiology*, vol. 602, no. 21, pp. 5757-5783. DOI: 10.1113/JP285230.
8. Tremblay J.C., Ainslie P.N. Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, vol. 118, no. 18, p. e2102463118. DOI: 10.1073/pnas.2102463118.
9. Storz J.F., Scott G.R. Phenotypic plasticity, genetic assimilation, and genetic compensation in hypoxia adaptation of high-altitude vertebrates. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2021, vol. 253, pp. 110865. DOI: 10.1016/j.cbpa.2020.110865.
10. Paw M., Kusiak A.A., Nit K. et al. Hypoxia enhances anti-fibrotic properties of extracellular vesicles derived from hiPSCs via the miR302b-3p/TGFβ/SMAD2 axis. *BMC Medicine*, 2023, vol. 21, p. 412. DOI: 10.1186/s12916-023-03117-w.
11. Semenza G.L. Oxygen sensing, hypoxia-inducible factors, and disease pathophysiology. *Annual Review of Pathology: Mechanisms of Disease*, 2014, vol. 9, pp. 47-71. DOI: 10.1146/annurev-pathol-012513-104720.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:
Асият Гисаевна Шокуева – старший преподаватель кафедры нормальной и патологической физиологии человека Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: schokueva@yandex.ru.
Ирина Хасанбиевна Борукаева – доктор медицинских наук, заведующий кафедрой нормальной и патологической физиологии человека Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: irborukaeva@yandex.ru.
Фатима Валерьевна Шаваева – кандидат биологических наук, доцент кафедры нормальной и патологической физиологии человека Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: shavaevafv@mail.ru.
Анзор Аскербиевич Молов – кандидат биологических наук, доцент кафедры нормальной и патологической физиологии человека Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: anzormolov71@gmail.com.
Таужан Хачимовна Агнокова – кандидат медицинских наук, доцент института стоматологии и челюстно-лицевой хирургии Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик, e-mail: agnokova-t@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Asiyat G. Shokueva – Senior Lecturer of the Department of Normal and Pathological Human Physiology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: schokueva@yandex.ru.
Irina Kh. Borukaeva – Doctor of Medical Sciences, Head of the Department of Normal and Pathological Human Physiology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: irborukaeva@yandex.ru.
Fatima V. Shavaeva – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Normal and Pathological Human Physiology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: shavaevafv@mail.ru.
Anzor A. Molov – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Normal and Pathological Human Physiology, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: anzormolov71@gmail.com.
Tauzhan Kh. Agnokova – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Institute of Dentistry and Maxillofacial Surgery, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik, e-mail: agnokova-t@mail.ru.

Для цитирования: Адаптационные перестройки кислородного статуса и функциональных резервов у студентов различных климатогеографических групп при нормобарической интервальной гипокситерапии / А.Г. Шокуева, И.Х. Борукаева, Ф.В. Шаваева [и др.] // Современные вопросы биомедицины. – 2026. – Т. 10. – № 2(37). DOI: 10.24412/2588-0500-2026_10_02_17

For citation: Shokueva A.G., Borukaeva I.Kh., Shavaeva F.V., Molov A.A., Agnokova T.Kh. Adaptive changes in oxygen status and functional reserves in students from different climatic-geographical groups following a course of normobaric intermittent hypoxia. *Modern Issues of Biomedicine*, 2026, vol. 10, no. 2(37). DOI: 10.24412/2588-0500-2026_10_02_17