DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

Реполяризация желудочков сердца у практически здоровых молодых мужчин при кратковременном воздействии нормобарической изокапнической и гиперкапнической гипоксии

Е.В. Заменина[1], Н.И. Ивонина[1], А.А. Фокин[2], И.М. Рощевская[1]

[1] Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Россия;
[2] Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Воздействие гипоксического фактора на функционирование кардиореспираторной системы человека изучено достаточно хорошо. Комбинированное воздействие гипоксического и гиперкапнического факторов снижает степень проявления неблагоприятных эффектов кислородной недостаточности во всех функциональных системах организма и субъективно улучшает переносимость острой гипоксии.

Цель. Изучить электрическую активность сердца в период реполяризации желудочков при воздействии экзогенной нормобарической гипоксии с различным содержанием углекислого газа во вдыхаемом воздухе у практически здорового нетренированного человека.

Материалы и методы. Проведено экспериментальное одноцентровое проспективное исследование. В него включены практически здоровые нетренированные мужчины молодого возраста. Среди критериев исключения выделяли наличие хронической бронхолёгочной патологии, сердечно-сосудистых заболеваний, а также факта недавно перенесённой острой респираторной вирусной инфекции. Участники исследования рандомно разделены на две группы в зависимости от изучаемого воздействия: 1-я группа — экзогенной изокапнической гипоксии; 2-я группа — экзогенной гиперкапнической гипоксии. Изокапническая и гиперкапническая гипоксия смоделированы путём дыхания через лицевую маску в течение 15 мин. По электрическому полю сердца анализировали амплитудно-временные характеристики положительных и отрицательных экстремумов в фазу реполяризации желудочков по данным электрокардиограммы, полученной во II стандартном отведении, определяли длительность интервалов QT, $J–T_{peak}$, $T_{peak}–T_{end}$, корригированных по Базетту.

Результаты. Установлено, что изокапническая гипоксия вызывает более значительное изменение SpO_2 и частоты сердечных сокращений по сравнению с гиперкапнической. При сопоставимых значениях SpO_2 анализ временных характеристик реполяризации показал, что гиперкапнический компонент в гипоксической смеси нивелирует степень изменения длительности практически всех исследуемых интервалов электрокардиограммы.

Заключение. Проведённое исследование процесса реполяризации желудочков сердца при воздействии гипоксии с различным содержанием CO_2 показало более выраженное стрессовое влияние изокапнической гипоксии на электрическую активность сердца по сравнению с гиперкапнической у практически здоровых молодых мужчин.

Ключевые слова: электрическое поле сердца; ЭКГ; нормобарическая изокапническая гипоксия, гиперкапническая гипоксия.

Как цитировать:
Заменина Е.В., Ивонина Н.И., Фокин А.А., Рощевская И.М. Реполяризация желудочков сердца у практически здоровых молодых мужчин при кратковременном воздействии нормобарической изокапнической и гиперкапнической гипоксии // Экология человека. 2025. Т. 32, № 2. С. 123–134. DOI: 10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

Рукопись поступила: 27.12.2024 **Рукопись одобрена:** 03.06.2025 **Опубликована online:** 17.06.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Распространяется на условиях лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

Ventricular Repolarization in Apparently Healthy Young Men Under Short-Term Normobaric Isocapnic and Hypercapnic Hypoxic Exposure

Elena V. Zamenina[1], Natalya I. Ivonina[1], Andrei A. Fokin[2], Irina M. Roshchevskaya[1]

[1] Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia;
[2] Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The effects of hypoxic exposure on the human cardiorespiratory system have been extensively studied. Combined hypoxic and hypercapnic exposure has been shown to reduce the severity of adverse outcomes associated with oxygen deficiency across all functional systems, while also improving subjective tolerance to acute hypoxia.

AIM: To assess cardiac electrical activity during the ventricular repolarization phase under exogenous normobaric hypoxic exposure with different inspired carbon dioxide levels in apparently healthy, untrained individuals.

METHODS: A prospective, single-center, experimental study was conducted. The study included apparently healthy, untrained young men. Exclusion criteria: chronic pulmonary or cardiovascular diseases and recent acute respiratory viral infections. Participants were randomly assigned to one of two groups based on the type of exposure: exogenous isocapnic hypoxia (Group 1) or exogenous hypercapnic hypoxia (Group 2). Isocapnic and hypercapnic hypoxia were simulated by breathing through a facial mask for 15 minutes. The cardiac electric field was used to assess the amplitude and temporal characteristics of positive and negative extrema during the ventricular repolarization phase based on lead II electrocardiogram findings. The duration of *QT*, J–T_{peak}, and T_{peak}–T_{end} intervals with Bazett's correction was measured.

RESULTS: Isocapnic hypoxia was found to cause more pronounced changes in SpO_2 and heart rate compared to hypercapnic hypoxia. At comparable SpO_2 levels, analysis of the temporal characteristics of ventricular repolarization demonstrated that the hypercapnic component of the hypoxic gas mixture reduced changes in the duration of nearly all examined electrocardiogram intervals.

CONCLUSION: The study of ventricular repolarization under hypoxic exposure with various CO_2 levels found that isocapnic hypoxia had a more pronounced stress effect on cardiac electrical activity than hypercapnic hypoxia in apparently healthy young men.

Keywords: cardiac electric field; ECG; normobaric isocapnic hypoxia; hypercapnic hypoxia.

To cite this article:
Zamenina EV, Ivonina NI, Fokin AA, Roshchevskaya IM. The ventricular repolarization of the heart in healthy young men under short-term exposure of the normobaric isocapnic and hypercapnic hypoxia. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(2):123–134. DOI: 10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

Submitted: 27.12.2024 **Accepted:** 03.06.2025 **Published online:** 17.06.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

几乎健康的年轻男性在短暂暴露于常压等碳酸血症性与高碳酸血症性低氧条件下心室复极反应的研究

Elena V. Zamenina[1], Natalya I. Ivonina[1], Andrei A. Fokin[2], Irina M. Roshchevskaya[1]

[1] Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia;
[2] Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

摘要

论证。低氧因素对人体心肺系统功能的影响已有充分研究。低氧与高碳酸血症的联合影响可降低机体各功能系统对缺氧状态的不良反应，并在主观上提高对急性低氧的耐受性。

目的。探讨在吸入不同二氧化碳浓度的常压低氧条件下，几乎健康的未训练年轻男性在心室复极期的心脏电活动变化。

方法。开展了一项单中心前瞻性实验研究。研究对象为几乎健康、无训练的青年男性。排除标准包括慢性支气管肺疾病、心血管疾病及近期急性呼吸道病毒感染史。受试者按所接受的干预随机分为两组：第1组接受等碳酸血症性低氧暴露，第2组接受高碳酸血症性低氧暴露。等碳酸血症性与高碳酸血症性低氧状态通过佩戴面罩吸入混合气体15分钟进行模拟。根据II导联心电图数据，分析心室复极期心电场正负极值的振幅-时间参数，测量QT、J－Tpeak和Tpeak－Tend间期，并根据Bazett公式进行校正。

结果。与高碳酸血症性低氧相比，等碳酸血症性低氧引起SpO2和心率的变化更为明显。在两组SpO2值相近的情况下，复极期时间参数的分析表明，低氧混合气体中的高碳酸成分可抵消几乎所有心电图所测间期时长的变化程度。

结论。所开展的研究显示，在不同CO2含量的低氧暴露下，等碳酸血症性低氧相比高碳酸血症性低氧对几乎健康的年轻男性心室复极过程中的心脏电活动产生了更明显的应激影响。

关键词：心电场；心电图；常压等碳酸血症性低氧；高碳酸血症性低氧。

引用本文：
Zamenina EV, Ivonina NI, Fokin AA, Roshchevskaya IM. 几乎健康的年轻男性在短暂暴露于常压等碳酸血症性与高碳酸血症性低氧条件下心室复极反应的研究. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2025;32(2):123–134. DOI: 10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

收到: 27.12.2024 **接受:** 03.06.2025 **发布日期:** 17.06.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

Воздействие гипоксического фактора на функционирование кардиореспираторной системы человека изучено достаточно хорошо. Выделены основные направления развития гипоксической стресс-реакции организма при различных концентрациях экзогенного кислорода. Профилактические и лечебные свойства гипоксических газовых смесей, применяемых как в прерывистом, так и пролонгированном режиме (гипокситерапия), находят широкое использование. Сочетание газов с различным содержанием кислорода применяют в зависимости от конкретных исследовательских или клинических задач [1–4]. Комбинированное воздействие гипоксического и гиперкапнического факторов снижает степень проявления неблагоприятных эффектов кислородной недостаточности во всех функциональных системах организма и субъективно улучшает переносимость острой гипоксии [5].

Наиболее зависимыми от концентрации эндогенного кислорода являются мозг и сердце, потребляющие больше половины всего кислорода, поступающего в организм [3]. Непрерывная ритмическая активность сердца обусловливает высокую чувствительность миокарда к уменьшению парциального давления кислорода в крови, его снижение подавляет электрогенез в кардиомиоцитах [6]. При гипоксии миокарда на электрокардиограмме (ЭКГ) преимущественно отмечают изменения реполяризации желудочков, однако они малоспецифичны. Вовлечение дополнительного количества регистрирующих электродов для проведения электрокардиографии на поверхности торса позволяет получить больше информации об электрической активности сердца в норме и при моделировании различных стресс-воздействий [7–9]. Исследования электрического поля сердца с использованием множественной синхронной регистрации кардиоэлектрических потенциалов на поверхности грудной клетки у здоровых людей в покое [10–12], спортсменов с различной направленностью тренировочного процесса, а также при воздействии физической нагрузки [13–15] подтвердили высокую информативность данного метода для оценки функционального состояния миокарда. Результаты также свидетельствуют о перспективности кардиоэлектротопографического подхода при изучении влияния изменённого кислородного режима на деятельность сердца.

Цель исследования. Изучить электрическую активность сердца в период реполяризации желудочков при воздействии экзогенной нормобарической гипоксии с различным содержанием углекислого газа во вдыхаемом воздухе у практически здорового нетренированного человека.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проведено экспериментальное одноцентровое проспективное исследование.

Критерии соответствия

Критерии включения:
- практически здоровые нетренированные мужчины;
- возраст — от 17 до 23 лет.

Критерии исключения:
- наличие хронической бронхолёгочной патологии;
- наличие сердечно-сосудистых заболеваний;
- недавно перенесённая острая респираторная вирусная инфекция.

Условия проведения

Исследование выполнено на базе отдела сравнительной кардиологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук».

Продолжительность исследования

Исследование проведено в период сентябрь-октябрь 2022 г.

Воздействие экзогенной нормобарической изокапнической и гиперкапнической гипоксии

В исходных условиях у участников исследования в положении сидя в кресле регистрировали частоту сердечных сокращений (ЧСС) и сатурацию гемоглобина крови (SpO_2) с использованием пульсокисметра MySign® S (EnviteC-Wismar GmbH, Германия). Кроме того, регистрировали ЭКГ в стандартных отведениях от конечностей, а также кардиоэлектрические потенциалы на поверхности грудной клетки. Затем участника эксперимента переводили на дыхание гипоксической смесью через лицевую маску.

Воздействие изокапнической гипоксии осуществляли в течение 15 мин в условиях нормального атмосферного давления при помощи изокапнической гипоксической газовой смеси (содержание O_2 и CO_2 — 12–13 и 0,04% соответственно). Использовали гипоксикатор OXYTERRA® (ООО «OXYTERRA», Россия) и модифицированный гипоксикатор Kröber® O_2 (Kröber Medizintechnik, Германия) (свидетельство на полезную модель № 24098 от 27 июля 2002 г.). Содержание O_2 в газовой смеси контролировали при помощи кислородного датчика (EnviteC-Wismar GmbH, Германия). Участник эксперимента дышал газовой смесью 15 мин, затем маску снимали и он переходил на дыхание атмосферным воздухом в течение 5 мин.

Воздействие гиперкапнической гипоксии осуществляли в течение 15 мин с использованием метода возвратного дыхания через лечебно-диагностический тренажёр

«Карбоник» (ООО НПК «Карбоник», Россия). Данный прибор создаёт гиперкапническую гипоксию (содержание O_2 и CO_2 до 12 и 5–8% соответственно) в альвеолярном воздухе путём автоматического регулирования объёма мёртвого пространства. При помощи программного обеспечения Carbonic Software® v. 2.00 (ООО НПК «Карбоник», Россия) и кислородного датчика выполняли мониторинг концентрации O_2 и CO_2 в выдыхаемом воздухе. Участник эксперимента дышал газовой смесью 15 мин, затем маску снимали и он переходил на дыхание атмосферным воздухом в течение 5 мин.

Регистрацию ЧСС, SpO_2, ЭКГ во II стандартном отведении и кардиоэлектрических потенциалов проводили на каждой минуте исследования.

Основной исход исследования

Оценка электрической активности сердца в период реполяризации желудочков при воздействии экзогенной нормобарической гипоксии с различным содержанием углекислого газа во вдыхаемом воздухе.

Анализ в группах

Участники исследования рандомно разделены на две группы в зависимости от изучаемого воздействия:

- 1-я группа — экзогенной изокапнической гипоксии;
- 2-я группа — экзогенной гиперкапнической гипоксии.

Многоканальное электрокардиографическое картирование

Электрическую активность сердца у обследуемых лиц изучали при помощи многоканального электрокардиографического картирования (ЭКГ-картирования) на поверхности тела с использованием автоматизированной системы для синхронной регистрации кардиоэлектрических потенциалов в период реполяризации желудочков сердца. Кардиоэлектрические потенциалы регистрировали на поверхности тела людей:

- в исходном состоянии;
- при воздействии обоих типов гипоксий;
- в период восстановления (дыхание атмосферным воздухом).

Униполярную ЭКГ регистрировали в положении сидя от 64 электродов, равномерно расположенных на вентральной и дорсальной сторонах туловища от уровня ключиц до нижнего края грудной клетки. Электроды расположены в 8 рядов по 8 в каждом (рис. 1, *a*). Синхронно с грудными записывали ЭКГ в стандартных биполярных отведениях от конечностей (I, II, III), в качестве референсного электрода для униполярных отведений с поверхности туловища использовали центральную терминаль Вильсона. После регистрации кардиоэлектрической активности строили эквипотенциальные моментные карты, отражающие распределение потенциалов электрического поля сердца (ЭПС) на прямоугольном изображении поверхности туловища, где левая сторона соответствовала вентральной, а правая — дорсальной стороне тела (см. рис. 1, *b*).

На эквипотенциальных моментных картах анализировали амплитудные характеристики положительных и отрицательных экстремумов ЭПС (A_{max} и A_{min} соответственно) и время достижения ими максимальных амплитуд в период реполяризации желудочков (T_{max} и T_{min} соответственно) относительно пика зубца *R* во II стандартном отведении, стабильность которого проверяли во всех конечностных и грудных отведениях перед началом анализа. Временные показатели экстремумов корригированы с интервалом *RR*, который рассчитывали по трём сердечным циклам. По данным ЭКГ во II стандартном отведении определяли корригированные по Базетту длительности:

- интервала *QT*;
- интервал от точки J до пика зубца *T* ($J–T_{peak}$);
- интервал от пика зубца *T* до его окончания ($T_{peak}–T_{end}$).

Этическая экспертиза

Исследование проведено в соответствии с принципами биомедицинской этики и одобрено локальным этическим комитетом отдела сравнительной кардиологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»,

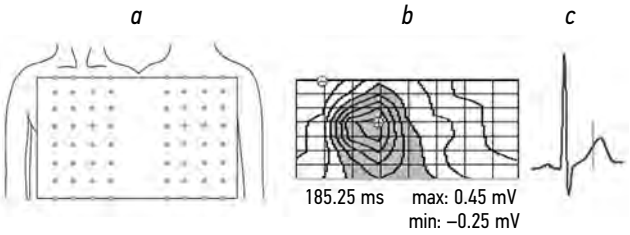

Рис. 1. Схема расположения электродов на поверхности грудной клетки человека (*a*) и эквипотенциальная моментная карта распределения кардиоэлектрических потенциалов на поверхности грудной клетки в период реполяризации желудочков сердца (*b*): закрашены области положительных потенциалов; знаки «+» и «–» на карте обозначают локализацию положительного и отрицательного экстремумов соответственно; под картой указано время в мс (ms) относительно пика зубца *R* во II стандартном отведении; указаны максимальная амплитуда положительного (max) и отрицательного (min) кардиопотенциалов в милливольтах (mV). Левая сторона карты соответствует передней (вентральной), а правая — задней (дорсальной) сторонам грудной клетки. *c* — электрокардиограмма во II стандартном отведении с маркёром времени (вертикальная черта).

Fig. 1. Electrodes' positions diagram on the surface of the human chest (*a*) and equipotential map of cardioelectric potential distribution on the chest surface during the ventricular repolarization phase (*b*): areas of positive potentials are shaded; the "+" and "–" symbols indicate the locations of the positive and negative extrema, respectively; the time (ms) relative to the peak of the *R* wave in standard lead II is indicated below the map; the maximum amplitude of the positive (max) and negative (min) cardiopotentials is shown in millivolts (mV). The left side of the map corresponds to the anterior (ventral), and the right side to the posterior (dorsal) chest surface. *c*, standard lead II electrocardiogram with time marker (vertical line).

(протокол № 1 от 06.04.2022). Участники исследования предварительно ознакомлены с его целью, возможными субъективными ощущениями при проведении гипоксического воздействия, от каждого из них получено письменное согласие.

Статистический анализ

Все непрерывные данные проанализированы с помощью программного пакета Statistica® версия 10.0 (StatSoft Inc., Соединённые Штаты Америки) и представлены в виде M±SD, где M — среднее арифметическое, SD — стандартное отклонение. Нормальность распределения проверяли с помощью критерия Шапиро–Уилка. Для сравнения средних значений одного и того же параметра в различные периоды времени применяли дисперсионный анализ для повторных измерений (RM-ANOVA). В случае выявления значимого влияния фактора времени на изучаемый параметр проводили апостериорный анализ (Post hoc тест) с помощью критерия Даннета. Для межгруппового сравнения показателей использовали непарный тест Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при p <0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты исследования

В исследовании приняли добровольное участие 25 практически здоровых мужчин (средний возраст — 20,7±0,9 года; масса тела — 76,5±7,8 кг, длина тела — 178,4±5,4 см). Участники исследования рандомно разделены на две группы в зависимости от изучаемого воздействия: 1-я группа — экзогенной изокапнической гипоксии (n=15); 2-я группа — экзогенной гиперкапнической гипоксии (n=10).

Практически у всех участников 1-й группы изменения ЧСС и SpO_2 были более выражены по сравнению с мужчинами 2-й группы. В 1-й группе максимальный прирост ЧСС наблюдали на 7-й мин гипоксии, он составил 29,2%, а наибольшее снижение SpO_2 — на 12-й мин, достигнув 22,4%. Во 2-й группе максимальный прирост ЧСС фиксировали на 10-й мин (8,7%), а минимальное значение SpO_2 — на 15-й мин (снижение на 7,7%). Увеличение ЧСС и снижение SpO_2 на каждой минуте воздействия гипоксии в двух группах были статистически значимыми. Изменения ЧСС и SpO_2 у мужчин 2-й группы характеризовались большей однородностью и меньшим разбросом в сравнении с 1-й группой (рис. 2).

Основные результаты исследования

Временные параметры электрической активности сердца при различных типах гипоксического воздействия при сопоставимом снижении сатурации гемоглобина крови

На 1-й и 3-й мин у мужчин 1-й и 2-й группы соответственно отмечено практически сопоставимое снижение SpO_2 относительно исходного уровня (см. рис. 2). С целью оценки влияния гиперкапнического фактора в гипоксической смеси на реполяризацию миокарда желудочков сердца проведён сравнительный анализ амплитудных и временных электрокардиографических характеристик мужчин 1-й и 2-й групп на 1-й и 3-й мин соответственно (табл. 1).

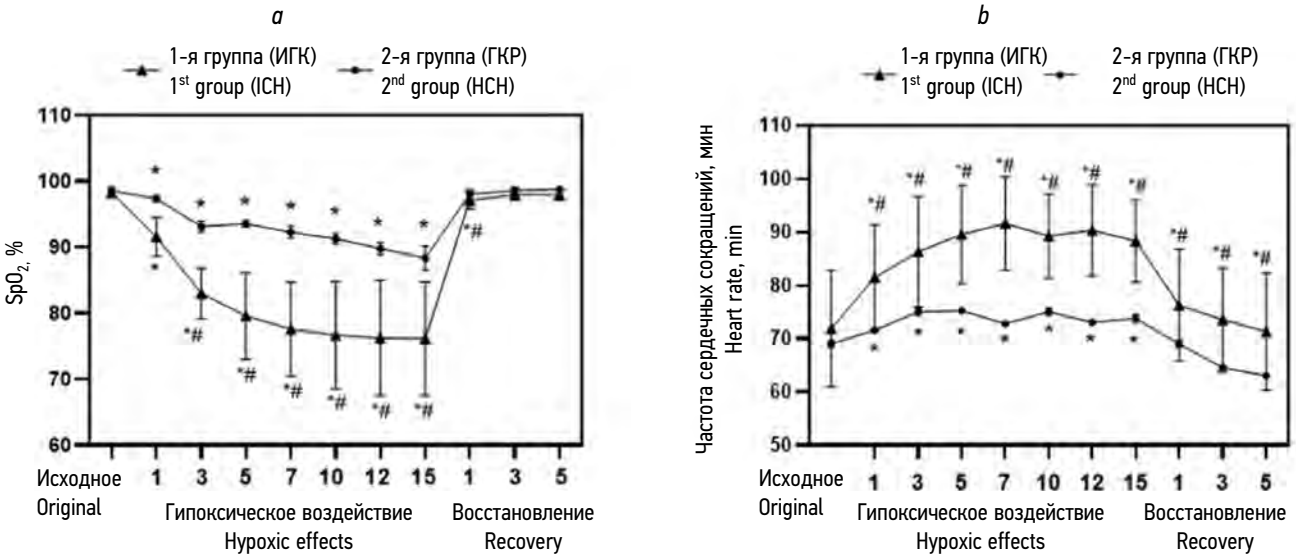

Рис. 2. Насыщение крови кислородом (*a*) и частота сердечных сокращений (*b*) при разных видах гипоксического воздействия относительно исходного состояния у участников исследования: * — статистически значимое отличие по сравнению с исходными показателями (p <0,05); # — статистически значимое отличие показателей между группами (p <0,05); ИКГ — изокапническая гипоксия; ГКГ — гиперкапническая гипоксия.

Fig. 2. Blood oxygen saturation (*a*) and heart rate (*b*) during different types of hypoxic exposure relative to baseline in study participants: *, significant difference compared to baseline (p < 0.05); #, significant difference between groups (p < 0.05); ICH, isocapnic hypoxia; HCH, hypercapnic hypoxia.

Таблица 1. Параметры электрокардиограммы во II отведении от конечностей и электрического поля сердца, исследуемые в группах
Table 1. Parameters of limb lead II electrocardiogram and cardiac electric field assessed in the study groups

Параметры Parameters	1-я группа Group 1	2-я группа Group 2	Значение непарного t-критерий Стьюдента Unpaired Student's t-test	*p*
Временные характеристики | Temporal characteristics				
J–T_{peak}, мс | J–T_{peak}, ms	230,6±11,6	229,0±20,0	t=0,21, df=23	0,83
T_{peak}–T_{end}, мс | T_{peak}–T_{end}, ms	81,7±2,7	82,8±10,4	t=0,32, df=23	0,74
QT, мс | *QT*, ms	417,7±8,4	415,9±29,4	t=0,063, df=23	0,95
T_{max}, мс | T_{max}, ms	246,6±8,2	261,8±20,6	t=2,18, df=23	0,039[1]
T_{min}, мс | T_{min}, ms	280,6±9,6	282,3±17,0	t=0,93, df=23	0,36
Амплитудные характеристики | Amplitude characteristics				
T, мВ | *T*, mV	0,45±0,24	0,43±0,21	t=0,37, df=23	0,71
A_{max}, мВ | A_{max}, mV	0,79±0,08	0,83±0,10	t=0,60, df=23	0,55
A_{min}, мВ | A_{min}, mV	–0,49±0,07	–0,41±0,04	t=1,73, df=23	0,09

Примечание. Временные и амплитудные характеристики указаны в группах при одинаковом снижении SpO_2: в 1-й и 2-й группах на 1-й и 3-й мин гипоксического воздействия соответственно; значения представлены в виде M±SD, где M — среднее арифметическое, SD — стандартное отклонение; [1] — статистически значимое различие между показателями в группах (p <0,05); J–T_{peak} — интервал от точки J до пика зубца *T*; T_{peak}–T_{end} — интервал от пика зубца *T* до его окончания; T_{max} — время достижения положительного экстремума; T_{min} — время достижения отрицательного экстремума; A_{max} — положительный экстремум; A_{min} — отрицательный экстремум.

Note: The temporal and amplitude characteristics are presented for both groups at comparable degrees of SpO_2 reduction: in Group 1 at minute 1 and in Group 2 at minute 3 of hypoxic exposure. Values are expressed as M ± SD, where M is the mean and SD is the standard deviation. 1, significant difference between groups (p < 0.05); J–T_{peak}, interval from the J point to the peak of the *T* wave; T_{peak}–T_{end}, interval from the peak to the end of the *T* wave; T_{max}, time to the positive extremum; T_{min}, time to the negative extremum; A_{max}, positive extremum; A_{min}, negative extremum.

Исходные временные и амплитудные характеристики электрической активности сердца в группах были статистически незначимыми. Однако во 2-й группе у мужчин на 3-й мин гипоксического воздействия (SpO_2 93,2±0,7%) наблюдали менее выраженное изменение временных характеристик по сравнению с 1-й группой на 1-й мин (SpO_2 91,3±2,0%). Межгрупповое различие по показателю T_{max} было статистически значимым (см. табл. 1).

Временные параметры электрической активности сердца при различных типах гипоксического воздействия в течение 15 мин

Дисперсионный анализ у мужчин 1-й группы выявил статистически значимое влияние гипоксии на продолжительность интервалов J–T_{peak} ($F_{(10, 140)}$=3,63, p <0,0001), и *QT* ($F_{(10, 140)}$=2,03, p=0,03), при этом интервал T_{peak}–T_{end} статистически значимо не изменялся ($F_{(10, 110)}$=0,95, p=0,48). Апостериорный анализ установил статистически значимое уменьшение продолжительности интервала J–T_{peak} у мужчин 1-й группы по сравнению с исходным состоянием на 3, 7 и 10-й мин воздействия (p=0,027; 0,022 и 0,039 соответственно), а также на 1-й мин восстановления (p=0,003). Изменения интервала *QT* у мужчин 1-й группы были статистически незначимы на всех минутах воздействия (рис. 3).

Во 2-й группе статистический анализ (RM-ANOVA) продемонстрировал влияние гипоксического воздействия на длительность интервалов J–T_{peak} ($F_{(10, 90)}$=6,26, p <0,001), T_{peak}–T_{end} ($F_{(10, 90)}$=6,6, p <0,001) и *QT* ($F_{(10, 90)}$=6,78, p <0,0001). По результатам апостериорного анализа выявлено статистически значимое уменьшение продолжительности интервалов J–T_{peak} на 5-й мин восстановления (p=0,007), T_{peak}–T_{end} — на 3-й мин гипоксического воздействия (p=0,021) и на 5-й мин восстановления (p=0,024), а также *QT* на 5-й мин восстановления (p=0,013).

Межгрупповые различия выявлены по продолжительности интервала J–T_{peak}: у мужчин 1-й группы наблюдали статистически значимое его уменьшение в период с 3-й по 10-ю мин гипоксического воздействия, а также на 1-й мин восстановления дыханием атмосферным воздухом по сравнению с участниками 2-й группы.

Дисперсионный анализ выявил влияние обоих видов гипоксии на корригированные с ритмом значения T_{max} и T_{min} в период реполяризации миокарда (рис. 4).

Во 2-й группе влияние гиперкапнической гипоксии на корригированный показатель T_{max} ($F_{(10, 90)}$=16,3, p=0,00001) сопровождалось его статистически значимым уменьшением на всех минутах воздействия (с 1-й по 15-ю мин, p <0,0001), а также в период восстановления (1–5 мин, p <0,0001). Показатель T_{min} демонстрировал менее явную динамику ($F_{(10, 90)}$=3,83, p <0,0001); апостериорный анализ показал уменьшение времени достижения отрицательным экстремумом своей амплитуды только на 3-й и 5-й мин восстановления.

В 1-й группе воздействие изокапнической гипоксии на ЭПС было менее значительным: при отсутствии статистически значимых изменений T_{max} ($F_{(10, 140)}$=0,33, p=0,96), выявлено статистически значимое снижение T_{min}

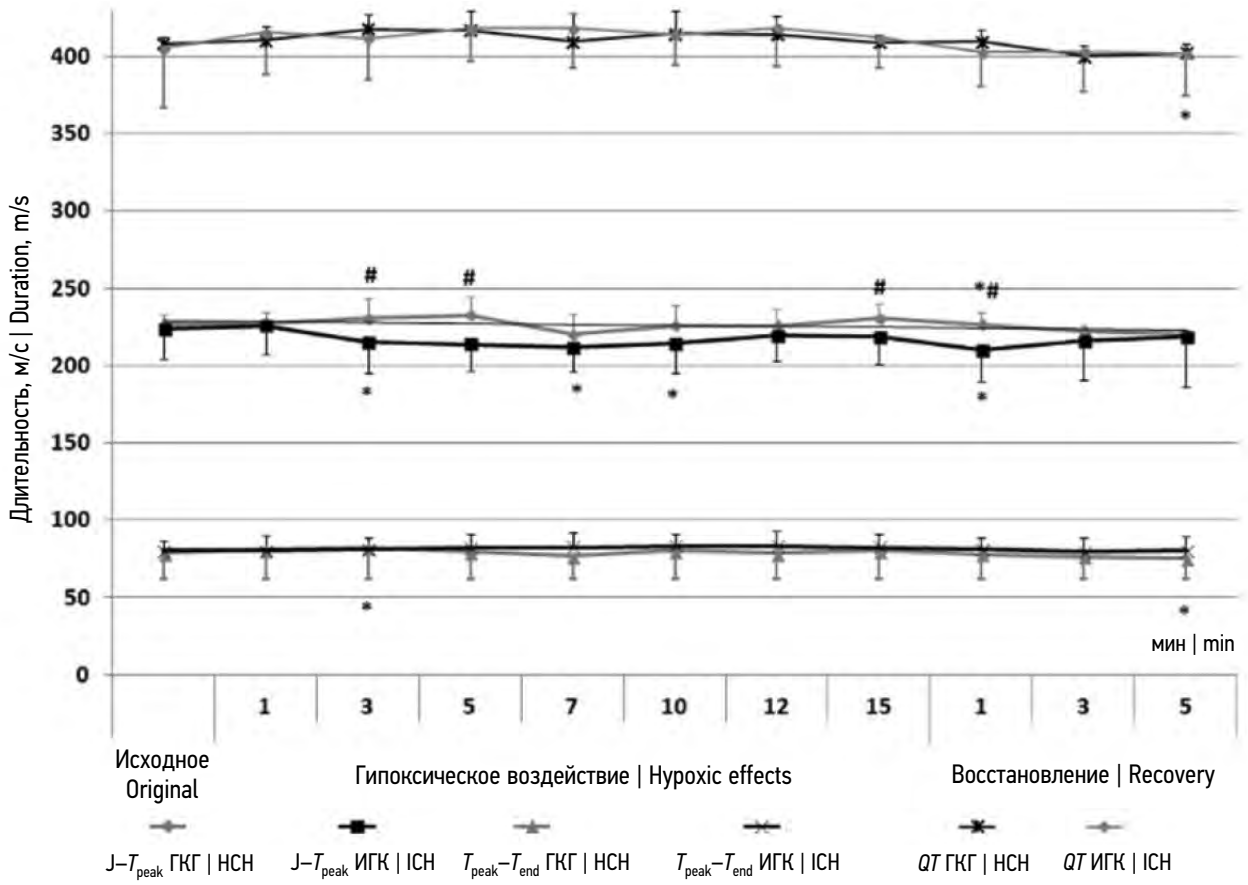

Рис. 3. Временные характеристики при разных видах гипоксического воздействия у участников исследования: * — статистически значимое отличие показателя по сравнению с исходным значением при воздействии изокапнической гипоксии (p <0,05); # — статистически значимое отличие показателя по сравнению с исходным значением при воздействии гиперкапнической гипоксии (p <0,05); ИКГ — изокапническая гипоксия; ГКГ — гиперкапническая гипоксия; J–T_{peak} — интервал от точки J до пика зубца T; T_{peak}–T_{end} — интервал от пика зубца T до его окончания.
Fig. 3. Temporal characteristics during different types of hypoxic exposure in study participants: *, significant difference compared to baseline under isocapnic hypoxic exposure (p < 0.05); #, significant difference compared to baseline under hypercapnic hypoxic exposure (p < 0.05); ICH, isocapnic hypoxia; HCH, hypercapnic hypoxia; J–T_{peak}, interval from the J point to the peak of the T wave; T_{peak}–T_{end}, interval from the peak to the end of the T wave.

($F_{(10, 140)}$=2,86, p=0,0027) на 3, 5, 7, 10, 12 и 15-й мин гипоксического воздействия (p=0,017; 0,002; 0,038; 0,001; 0,01 и 0,002 соответственно), а также на 1-й мин восстановления (p <0,0001).

Межгрупповой анализ показал статистически значимые различия показателя T_{max} с 10-й по 15-ю мин гипоксии (p <0,05), с 1-й по 5-ю мин восстановления (p <0,001). Значения T_{min} также имели статистически значимые различия между группами в аналогичные промежутки времени (p <0,05).

Амплитудные параметры электрической активности сердца в период реполяризации желудочков при различных типах гипоксического воздействия в течение 15 мин

Исходные значения амплитуды волны T во II стандартном отведении у мужчин в двух группах не имели статистически значимого различия. Так, в 1-й группе её значение составило 0,48±0,28 мВ, тогда как во 2-й группе — 0,47±0,25 мВ. На протяжении всего периода гипоксического воздействия и восстановления статистически значимых изменений амплитуды T во II стандартном отведении у мужчин в группах не обнаружено.

Анализ амплитудных параметров ЭПС, зарегистрированных на поверхности тела, также не выявил статистически значимых межгрупповых различий исходных значений: A_{max} в 1-й и 2-й группах составила 0,91±0,09 и 0,90±0,10 мВ соответственно. Статистически значимого изменения A_{max} в группах не происходило, однако отмечена тенденция к снижению данного показателя в 1-й группе на 7, 10 и 12-й мин дыхательной экспозиции (p=0,061; 0,073; 0,061 соответственно).

Исходные значения A_{min} также не имели статистически значимых отличий в группах: в 1-й и 2-й группе — 0,50±0,06 и 0,44±0,05 мВ соответственно. Однако в 1-й группе происходило постепенное снижение A_{min}, достигавшее статистически значимых отличий от исходных на 5, 7 и 10-й мин гипоксического воздействия: –0,40±0,13 (p=0,047), –0,37±0,11 (p=0,043) и –0,38±0,08 мВ (p=0,01) соответственно. Во 2-й группе статистически значимых

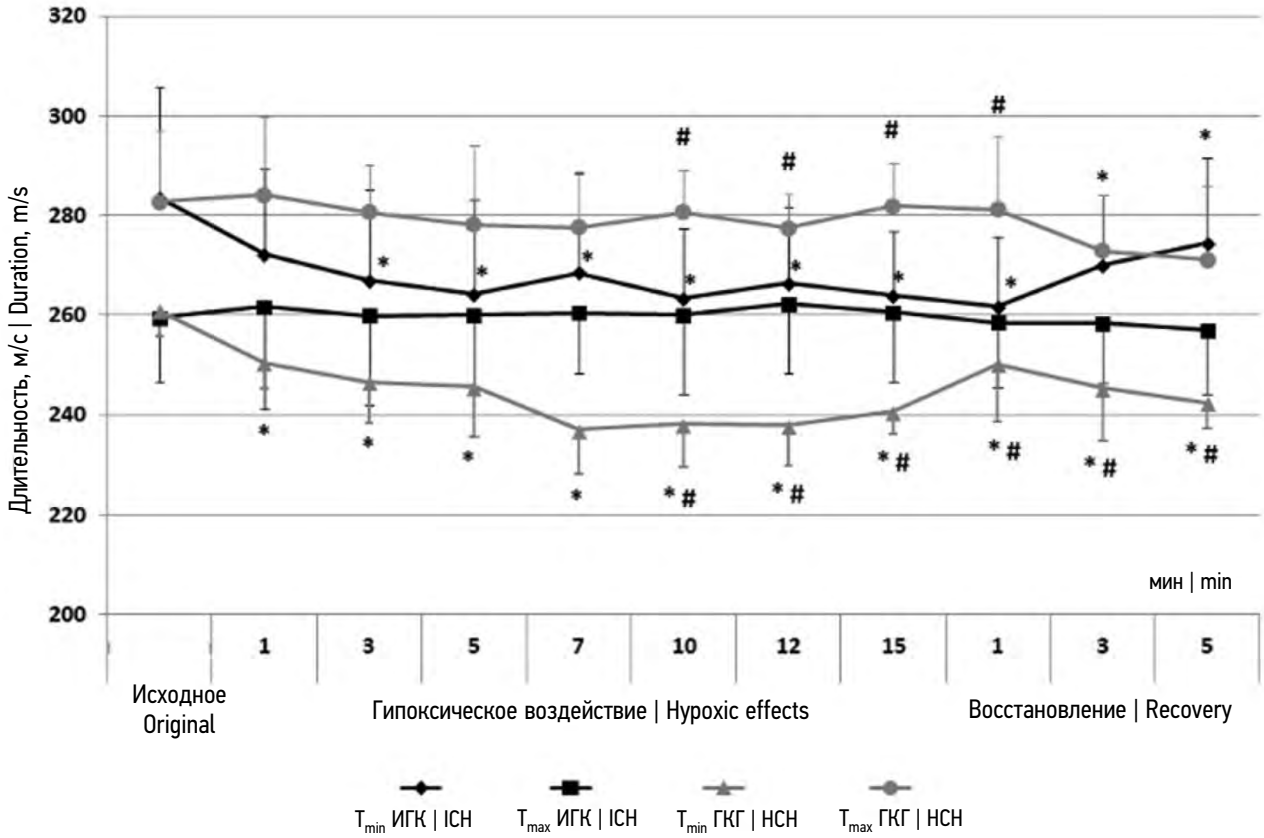

Рис. 4. Корригированное время достижения экстремумов электрического потенциала максимальной амплитуды в фазе реполяризации желудочков при различных формах гипоксии: * — статистически значимое изменение показателя по сравнению с исходным значением (p <0,05); ИКГ — изокапническая гипоксия; ГКГ — гиперкапническая гипоксия; T_{max} — время достижения положительного экстремума; T_{min} — время достижения отрицательного экстремума.

Fig. 4. Corrected time to maximum amplitude extrema of electric potential during the ventricular repolarization phase under different forms of hypoxic exposure: *, significant change compared to baseline (p < 0.05); ICH, isocapnic hypoxia; HCH, hypercapnic hypoxia; T_{max}, time to the positive extremum; T_{min}, time to the negative extremum.

изменений A_{min} не выявлено.

ОБСУЖДЕНИЕ

Резюме основного результата исследования

Сравнительный анализ показал, что у молодых здоровых мужчин нормобарическая гиперкапническая гипоксия вызывает менее выраженные изменения электрической активности сердца в фазу реполяризации миокарда по сравнению с изокапнической.

Обсуждение основного результата исследования

Острая реакция кардиореспираторной системы на гипоксическое воздействие направлена на поддержание гомеостаза и обеспечение адекватного кровоснабжения жизненно важных, высокоэнергозатратных органов. Она проявляется учащением сердечного ритма, повышением системного артериального давления и увеличением частоты дыхания [2, 16]. Сравнительные исследования продемонстрировали различие в характере срочной кардиореспираторной реакции на разные виды гипоксического воздействия. Так, при изокапнической гипоксии преимущественно активизируются механизмы, усиливающие сердечную деятельность, в то время как увеличение доли углекислого газа во вдыхаемой гипоксической смеси приводит к активации хеморецепторов каротидных телец, что сопровождается усилением дыхательной деятельности за счёт увеличения глубины вдоха [17–19]. В нашем исследовании оба типа гипоксического воздействия вызвали схожую реакцию, характеризующуюся увеличением ЧСС и снижением SpO_2, на протяжении всей экспозиции. Однако при гиперкапнической гипоксии её снижение было статистически значимо менее выраженным на каждой минуте воздействия как в абсолютных показателях, так и по приросту относительно исходного состояния.

При сопоставимом снижении SpO_2 на фоне изокапнической и гиперкапнической гипоксии межгрупповых различий в изменении большинства временных параметров ЭКГ и ЭПС, корригированных по ритму, не выявлено. Исключение составило статистически значимое менее выраженное уменьшение T_{max} при воздействии гиперкапнической гипоксии по сравнению с изокапнической. Полученные данные могут свидетельствовать о частичном нивелировании

эффектов гипоксического воздействия за счёт присоединения гиперкапнического компонента, проявляющегося уже в первые минуты экспозиции.

Реполяризация желудочков сердца представляет особый интерес для исследователей ввиду высокой чувствительности к воздействию различных внешних и внутренних факторов. При гипоксической экспозиции основными модуляторами данной фазы сердечного цикла выступают изменения парциального давления газов крови, а также и её электролитного состава [6, 20]. В нашем исследовании гипоксическое воздействие было кратковременным, что, по мнению Н.И. Саповой и соавт. [2] и Л.Д. Лукьяновой и соавт. [3], не приводит к значительным изменениям электролитного состава крови, способным непосредственно повлиять на параметры ЭКГ. Вместе с тем даже кратковременная гипоксия снижает активность энергозависимых ионных насосов мембраны кардиомиоцитов, изменяя их функциональное состояние. Влияние изокапнической гипоксии на миокард проявляется в изменениях реполяризации желудочков, что отражается в виде трансформации формы и амплитуды *T*-волны, увеличения длительности интервала *QT*, а также возможного смещения сегмента *ST* относительно изолинии [21–23]. Детализацию изменений реполяризации желудочков сердца проводят с помощью оценки длительности интервалов J–T_{peak}, T_{peak}–T_{end}, клинически подтвердивших свою информативность в качестве маркёров аритмогенности [24, 25]. Уменьшение длительности интервала J–T_{peak} в сочетании с укорочением *QT* является типичной реакцией на кислородную недостаточность [25, 26]. Ранее мы показали, что у практически здорового человека на начальных стадиях развития гипоксического состояния общая длительность реполяризации желудочков тесно коррелирует с продолжительностью интервала J–T_{peak}, а при более значительном падении SpO_2 растёт взаимосвязь с длительностью T_{peak}–T_{end} [22]. Изменение продолжительности периода реполяризации желудочков происходит преимущественно за счёт интервала J–T_{peak}, при этом межгрупповые различия в изменении его длительности отмечают с первой минуты воздействия изокапнической и гиперкапнической гипоксии, когда глубина гипоксемии ещё незначительна. Результаты нашего исследовании свидетельствуют о более значительном влиянии изокапнической гипоксии на реполяризацию миокарда по сравнению с гиперкапнической. Более интенсивное её влияние на организм обусловлено прежде всего метаболическим ацидозом, который на ранних стадиях развития гипоксического состояния активирует системный ответ организма (усиление дыхания и сердечно-сосудистые изменения), при продолжающемся — формирует перестройку дыхательной цепи в митохондриях [3]. Однако накопление кислых продуктов реакции смещает кислотно-основные свойства крови, которые на фоне вымывания CO_2 (из-за гипервентиляции) прогрессивно нарастают и уже не активируют, а подавляют действие ферментов кислородтранспортной цепи. Именно поэтому увеличение доли CO_2 во вдыхаемом воздухе снижает выраженность гипоксических реакций, увеличивая буферную ёмкость крови [27]. Таким образом, гиперкапническая гипоксия за счёт введения CO_2 обеспечивает менее явный системный ответ.

При многоканальном ЭКГ-картировании особое внимание уделяют исследованию амплитудно-временных характеристик экстремумов ЭПС, что даёт представление о процессе восстановления возбудимости миокарда при различных физиологических состояниях или внешних воздействиях [9, 11, 12]. Ранее мы оценили ЭПС у пловцов, тренировочный процесс которых проходит в условиях задержки дыхания и повышенного pCO_2 в крови, и выявили, что адаптация к воздействию гипоксического и гиперкапнического факторов у них приводит к менее значимым изменениям реполяризации желудочков сердца в ответ на острую гипоксию, чем у нетренированных людей — изменяются преимущественно временные, а не амплитудные параметры [28]. Настоящее исследование показало, что у нетренированного человека изокапническая гипоксия вызывает изменения как амплитудных, так и временных характеристик экстремумов ЭПС, тогда как при гиперкапнической форме изменения затрагивают преимущественно временные параметры. Это свидетельствует о более выраженном стресс-воздействии на миокард изокапнической гипоксии. Разнонаправленные изменения амплитудно-временных характеристик экстремумов ЭПС у спортсменов-пловцов при нормобарической гипоксии [29] указывают на изменение продолжительности и внутренней структуры реполяризации желудочков сердца. Амплитуда *T*-волны на ЭКГ в стандартных отведениях характеризует суммарную электрическую активность кардиомиоцитов в процессе реполяризации, тогда как при многоканальном ЭКГ-картировании локализация и амплитуда экстремумов показывает максимальный потенциал реполяризованной области в конкретный момент времени, его изменения при воздействиях является более чувствительным показателем электрической активности сердца [10]. Изучение амплитудных характеристик у исследуемых при одинаковом (на 1-й и 3-й мин изокапнической и гиперкапнической гипоксии соответственно) и разном (продолжительностью по 15 мин) уровнях гипоксемии показало отсутствие изменения амплитуды *T*-волны, тогда как межгрупповые различия в уменьшении T_{max} выявлены с первых минут воздействия (на одинаковом уровне гипоксемии) и до его конца, а T_{min} — уже при существенной разнице SpO_2 между представителями разных групп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование процесса реполяризации желудочков сердца при воздействии гипоксии с различным содержанием CO_2 показало более выраженное стрессовое влияние изокапнической гипоксии на электрическую активность сердца по сравнению с гиперкапнической у практически здоровых молодых мужчин.

Изменения длительности J–T_{peak}, T_{max}, T_{min}, зафиксированные при обоих типах гипоксии, были менее выражены в условиях гиперкапнической гипоксии как при сходном уровне гипоксемии (1-я и 3-я мин изокапнической и гиперкапнической гипоксии соответственно), так и при их расхождении (15-я мин), что проявилось в межгрупповых различиях исследуемых параметров.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Е.В. Заменина, Н.И. Ивонина, А.А. Фокин — сбор и анализ данных, интерпретация результатов, написание и редактирование текста рукописи; И.М. Рощевская — концепция исследования, интерпретация результатов, научное редактирование текста рукописи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведения исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность ООО «OXYTERRA» за предоставленный для исследования инновационный аппарат для получения гипоксических, гипероксических и нормоксических газовых смесей OXYTERRA. Авторы статьи благодарят канд. биол. наук. А.С. Шилова за помощь в организации и проведении исследования.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом отдела сравнительной кардиологии Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (протокол заседания № 1 от 06.04.2022).

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы использовано изображение (распределение электродов на поверхности туловища и эквипотенциальная моментная карта на рис. 1), заимствованное из работы Н.И. Пантелеевой и соавт. [Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. The heart electric field on the thorax surface of sportsmen-swimmers during ventricular repolarization under acute normobaric hypoxia. *Russian Journal of Physiology.* 2016;102(11):1383–1393. EDN: XYGYMZ] (распространяется на условиях лицензии CC-BY 4.0).

При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Авторы заявляют об открытом доступе к данным.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: E.V. Zamenina, N.I. Ivonina, A.A. Fokin: investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; I.M. Roshchevskaya: conceptualization, formal analysis, writing—review & editing. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to OXYTERRA LLC for providing the innovative OXYTERRA device for generating hypoxic, hyperoxic, and normoxic gas mixtures used in this study. The authors also thank A.S. Shilov, Cand. Sci. (Biology), for assistance with the organization and implementation of the research.

Ethics approval: The study was approved by the Local Ethics Committee of the Department of Comparative Cardiology, The Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Minutes No. 1 of April 6, 2022).

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: This study includes an image (electrode distribution on the torso surface and the equipotential map in Fig. 1) adapted from: Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. The heart electric field on the thorax surface of sportsmen-swimmers during ventricular repolarization under acute normobaric hypoxia. *Russian Journal of Physiology.* 2016;102(11):1383–1393. EDN: XYGYMZ (distributed under the CC-BY 4.0 license).

No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The authors declare that the data are publicly available.

Generative AI: No generative AI technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Hitrov NK, Paukov VS. *Adaptation of the heart to hypoxia*. Moscow: Medicina; 1991. (In Russ.) ISBN: 5-225-00653-1 Available from: https://search.rsl.ru/ru/record/01001616365?ysclid=mbndc51z3x816503700
2. Sapova NI, Ivanova AO. *Gipoksiterapnya.* Saint Petersburg: LLC "Medkniga"ELBI"; 2003. ISBN: 5-93979-074-7 EDN: XSXSZH
3. Lukjanova LD, Ushakov IB. *Problems of hypoxia: molecular, physiological and medical aspects*. Moscow: Istoki; 2004. (In Russ.) ISBN: 5-88242-282-5 EDN: QLGART
4. Tessema B, Sack U, König B, et al. Effects of intermittent hypoxia in training regimes and in obstructive sleep apnea on aging biomarkers and age-related diseases: a systematic review. *Frontiers in Aging Neuroscience.* 2022;14: 878278. doi: 10.3389/fnagi.2022.878278 EDN: BYSJPV
5. Kulikov VP, Tregub PP, Bespalov AG, Vvedenskiy AJ. Comparative efficacy of hypoxia, hypercapnia and hypercapnic hypoxia increases body resistance to acute hypoxia in rats. *Patologičeskaâ fiziologiâ i èksperimental'naâ terapiâ.* 2013;57(3):59–61. EDN: QCTYTS
6. Shimoda LA, Polak J. Hypoxia. 4. Hypoxia and ion channel function. *American Journal of Physiology-Cell Physiology.* 2011;300(5):C951–C967. doi: 10.1152/ajpcell.00512.2010 EDN: OMQTQH
7. Taccardi B, Punske B, Lux R, et al. Useful Lessons from Body Surface Mapping. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology.* 1998;9(7):773–786. doi: 10.1111/j.1540-8167.1998.tb00965.x
8. Kania M, Maniewski R, Zaczek R, et al. Optimal ECG lead system for exercise assessment of ischemic heart disease. *Journal of Cardiovascular Translational Research.* 2019;13(5):758–768. doi: 10.1007/s12265-019-09949-3 EDN: PSVYYA
9. Bergquist J, Rupp L, Zenger B, et al. Body surface potential mapping: contemporary applications and future perspectives. *Hearts.* 2021;2(4):514–542. doi: 10.3390/hearts2040040 EDN: UDSUWR

10. Medvegy M, Duray G, Pintér A, Préda I. body surface potential mapping: historical background, present possibilities, diagnostic challenges. *Annals of Noninvasive Electrocardiology.* 2002;7(2):139–151. doi: 10.1111/j.1542-474X.2002.tb00155.x EDN: YJIIEA
11. Roshchevskaya IM. *Cardioelectric field of warm blooded animals and humans*. Saint Petersburg: Nauka; 2008. ISBN: 978-5-02-026284-3 EDN: RLSJCR
12. de Ambroggi L, Corlan AD. Body surface potential mapping. In: *Macfarlane PW, van Oosterom A, Pahlm O, et al., editors. Comprehensive Electrocardiology.* London: Springer; 2010. P. 1375–1413. doi: 10.1007/978-1-84882-046-3_32
13. Strelnikova SV, Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. Spatiotemporal characteristics of the heart electrical field in the period of ventricular depolarization in athletes training endurance and strength. *Human Physiology*. 2014;40(5): 548–553. doi: 10.1134/S0362119714040148 EDN: UFVJBX
14. Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. Ventricular repolarization of the heart of cross-country skiers at different stages of the annual training cycle. *Human Physiology.* 2018;44(5):549–555. doi: 10.1134/S0362119718050134 EDN: OMKSHO
15. Ivonina NI, Roshchevskaya IM. Electric field of the heart on the thorax surface in highly trained athletes during initial ventricular activity. *Russian Journal of Physiology.* 2023;109(9):1233–1246. doi: 10.31857/S0869813923090054 EDN: ORUDUO
16. Hainsworth R, Drinkhill MJ, Rivera-Chira M. The autonomic nervous system at high altitude. *Clinical Autonomic Research.* 2007;17(1):13–19. doi: 10.1007/s10286-006-0395-7 EDN: XZWHVB
17. Honda Y. Respiratory and circulatory activities in carotid body-resected humans. *Journal of Applied Physiology.* 1992;73(1):1–8. doi: 10.1152/jappl.1992.73.1.1
18. Brown S, Barnes MJ, Mündel T. Effects of hypoxia and hypercapnia on human HRV and respiratory sinus arrhythmia. *Acta Physiologica Hungarica.* 2014;101(3):263–272. doi: 10.1556/APhysiol.101.2014.3.1
19. Kovalchuk SI, Kovganko AA, Dudchenko LS, et al. Influence hypoxic-hypercapnic training. *Medicina Kyrgyzstana*. 2015;(5):40–45. EDN: XIFBQB
20. Hool LC. Differential regulation of the slow and rapid components of guinea-pig cardiac delayed rectifier K+ channels by hypoxia. *The Journal of Physiology.* 2004;554(3):743–754. doi: 10.1113/jphysiol.2003.055442
21. Coustet B, Lhuissier FJ, Vincent R, Richalet JP. Electrocardiographic Changes During Exercise in Acute Hypoxia and Susceptibility to Severe High-Altitude Illnesses. *Circulation.* 2015;131(9):786–794. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.114.013144
22. Zamenina EV, Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. The heart electric field of man during ventricular repolarization under hypoxic influence. *Russian Journal of Physiology.* 2017;103(11):1330–1338. EDN: ZRRRDZ
23. Zamenina EV, Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. Heart electrical activity during ventricular repolarization in subjects with different resistances to hypoxia. *Human Physiology*. 2019;45(6):634–641. doi: 10.1134/S0362119719050207 EDN: MMPZWP
24. Castro-Torres Y. Tp-e interval and Tp-e/QTc ratio: new choices for risk stratification of arrhythmic events in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *The Anatolian Journal of Cardiology.* 2017;17(6):493–493. doi: 10.14744/AnatolJCardiol.2017.7865
25. Tse G, Yan BP. Traditional and novel electrocardiographic conduction and repolarization markers of sudden cardiac death. *EP Europace.* 2016;19(5):712–721. doi: 10.1093/europace/euw280
26. Clemente D, Pereira T, Ribeiro S. Repolarização ventricular em pacientes diabéticos: caracterização e implicações clínicas. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia.* 2012;99(5):1015–1022. doi: 10.1590/S0066-782X2012005000095
27. Akhundov R, Akhundova Kh. Energetical mechanisms of oxidative stress, endogenic and exogenic hypoxia. *Biomedicine*. 2009;(3):3–9.
28. Ivonina NI, Fokin AA, Roshchevskaya IM. Body surface potential mapping during heart ventricular repolarization in male swimmers and untrained persons under hypoxic and hypercapnic hypoxia. *High Altitude Medicine & Biology.* 2021;22(3):308–316. doi: 10.1089/ham.2020.0103 EDN: LICCWR
29. Panteleeva NI, Roshchevskaya IM. The heart electric field on the thorax surface of sportsmen-swimmers during ventricular repolarization under acute normobaric hypoxia. *Russian Journal of Physiology*. 2016;102(11):1383–1393. EDN: XYGYMZ

ОБ АВТОРАХ

*** Заменина Елена Всеволодовна;**
адрес: Россия, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24;
ORCID: 0000-0002-3438-6365;
eLibrary SPIN: 2894-6435;
e-mail: e.mateva@mail.ru

Ивонина Наталья Ивановна, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0002-5802-3753;
eLibrary SPIN: 8667-3261;
e-mail: bdr13@mail.ru

Фокин Андрей Александрович;
ORCID: 0000-0002-2038-2515;
eLibrary SPIN: 1060-3535;
e-mail: fokin.90@inbox.ru

Рощевская Ирина Михайловна, д-р биол. наук, профессор, член-корреспондент РАН;
ORCID: 0000-0002-6108-1444;
eLibrary SPIN: 5424-2991;
e-mail: compcard@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Elena V. Zamenina;**
address: 24 Kommunisticheskaya st, Syktyvkar, Russia, 167982;
ORCID: 0000-0002-3438-6365;
eLibrary SPIN: 2894-6435;
e-mail: e.mateva@mail.ru

Natalya I. Ivonina, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0002-5802-3753;
eLibrary SPIN: 8667-3261;
e-mail: bdr13@mail.ru

Andrei A. Fokin;
ORCID: 0000-0002-2038-2515;
eLibrary SPIN: 1060-3535;
e-mail: fokin.90@inbox.ru

Irina M. Roshchevskaya, Dr. Sci. (Biology), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences;
ORCID: 0000-0002-6108-1444;
eLibrary SPIN: 5424-2991;
e-mail: compcard@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author