Экология человека | Ekologiya cheloveka (Human Ecology)
Оригинальные исследования | Original study articles
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

Accepted for publication

## 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.

**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, № 3. С. XX–XX. DOI: 10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

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

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Экология человека | Ekologiya cheloveka (Human Ecology)
Оригинальные исследования | Original study articles
DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503
EDN: WQWAIA

# The ventricular repolarization of the heart in healthy young men under short-term exposure of the normobaric isocapnic and hypercapnic hypoxia

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

The effect of short-term normobaric isocapnic hypoxic and hypercapnic hypoxia on the electrical activity of the heart during ventricular repolarization was studied using multichannel ECG mapping on the thorax surface in healthy young men. Hypoxic hypoxia (HH, $O_2$ content - 12%, $CO_2$ – 0,04%) and hypercapnic hypoxia (HCH, $O_2$ content – 13%, $CO_2$ – 5-8%) were created exogenously by breathing through a face mask for 15 minutes. The amplitude-temporal characteristics of the positive and negative extremes during the ventricular repolarization were analyzed using the cardiac electrical field, and the durations of the QT, J-Tpeak, and Tpeak-Tend intervals corrected by Basette were determined on $ECG_{II}$. A comparative analysis of the effects of HH and HCH on the ventricular repolarization was carried out at the same and different levels of hypoxemia. A more significant change of $SpO_2$ and heart rate at hypoxic hypoxia, in comparison with hypercapnic hypoxia was revealed. At a similar level of decrease of the blood hemoglobin saturation, a comparison of the temporal characteristics of repolarization showed that the hypercapnic component in the hypoxic mixture eliminates the severity of changes in the duration of almost all the studied ECG intervals. At different level of hypoxemia in persons both of groups (15-minute exposure of HH and HCH), exposure of the hypoxic hypoxia results a more significant change in the duration of the corrected $J\text{-}Tpeak_{II}$ and temporal characteristics of the extremes of the cardiac electrical field – at HH significantly decreased the Tmin, at HCH decreased Tmax.

**Keywords:** cardiac electrical field; ECG; normobaric hypoxic 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(3):XX–XX. DOI: 10.17816/humeco643503 EDN: WQWAIA

Submitted: 27.12.2024 Accepted: 03.06.2025 Published online: 17.06.2025

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

Accepted for publication

Экология человека | Ekologiya cheloveka (Human Ecology)
Оригинальные исследования | Original study articles
DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503
EDN: WQWAIA

## 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

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.

## МЕТОДЫ

### Дизайн исследования

Проведено экспериментальное одноцентровое проспективное исследование.

### Критерии соответствия

*Критерии включения*:

- практически здоровые нетренированные мужчины;
- молодого возраста — от 17 до 23.

*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

Accepted for publication

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

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

Accepted for publication

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

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», г. Сыктывкар (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 и 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- и 3-й мин у мужчин 1- 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- и 2-й групп на 1- и 3-й мин соответственно (табл. 1).

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**

Accepted for publication

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

**гипоксического воздействия в течение 15 минут**

Дисперсионный анализ у мужчин 1-й группы выявил статистически значимое влияние гипоксии на продолжительность интервалов J–$T_{peak}$ ($F_{(10, 140)}$=3,63, $p$=0,0002), 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, $p$=0,000 01), $T_{peak}$–$T_{end}$ ($F_{(10, 90)}$=6,6, $p$=0,000 01) и $QT$ ($F_{(10, 90)}$=6,78, $p$=0,000 01). 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, $p$=0,000 01) 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, $p$=0,000 24); апостериорный анализ показал уменьшение времени достижения отрицательным экстремумом своей амплитуды только на 3- 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 $T_{min}$ ($F_{(10, 140)}$=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 ($p$=0,0005).

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 минут**

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 изменений $A_{min}$ не выявлено.

## ОБСУЖДЕНИЕ

### РЕЗЮМЕ ОСНОВНОГО РЕЗУЛЬТАТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Accepted for publication

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

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, проявляющемся 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 вымывании $CO_2$ (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

Accepted for publication

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

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 повышенным $pCO_2$ 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- 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- 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 одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**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. согласовано

Accepted for publication

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

**Оригинальность.** «При создании настоящей работы использовано изображение (распределение электродов на поверхности туловища и эквипотенциальная моментная карта на рис. 1), заимствованное из работы Пантелеевой Н. И. 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's contribution.** E.V. Zamenina, N.I. Ivonina, A.A. Fokin participated in the experimental procedures, bioinformatics data analysis; I.M. Roshchevskaya participated in the design of the study and contributed to data analysis and interpretation of results. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Acknowledgments.**
**Ethics approval.**
**Funding sources.** No funding.
**Disclosure of interests.**
**Statement of originality.**
**Data availability statement.**
**Generative AI.**
**Provenance and peer-review.**

## 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

Accepted for publication

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

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/ AUTHORS' INFO

Accepted for publication

Экология человека | Ekologiya cheloveka (Human Ecology)
Оригинальные исследования | Original study articles
DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503
EDN: WQWAIA


| Автор, ответственный за переписку: | |
|---|---|
| *** Заменина Елена Всеволодовна**;<br>адрес: Россия, 167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24;<br>ORCID: 0000-0002-3438-6365;<br>eLibrary SPIN: 2894-6435;<br>e-mail: e.mateva@mail.ru | * **Elena V. Zamenina**;<br>address: 24 Kommunisticheskaja st, Syktyvkar, Russia, 167982;<br>ORCID: 0000-0002-3438-6365;<br>eLibrary SPIN: 2894-6435;<br>e-mail: e.mateva@mail.ru |
| Соавторы (должны быть приведены в порядке их перечисления в списке авторов рукописи): | |
| **Ивонина Наталья Ивановна**, канд. биол. наук;<br>ORCID: 0000-0002-5802-3753;<br>eLibrary SPIN: 8667-3261;<br>e-mail: bdr13@mail.ru | **Natalya I. Ivonina**, Cand. Sci. (Biology);<br>ORCID: 0000-0002-5802-3753;<br>eLibrary SPIN: 8667-3261;<br>e-mail: bdr13@mail.ru |
| **Фокин Андрей Александрович**;<br>ORCID: 0000-0002-2038-2515;<br>eLibrary SPIN: 1060-3535;<br>e-mail: fokin.90@inbox.ru | **Andrei A. Fokin**;<br>ORCID: 0000-0002-2038-2515;<br>eLibrary SPIN: 1060-3535;<br>e-mail: fokin.90@inbox.ru |
| **Рощевская Ирина Михайловна**, д-р биол. наук, профессор, член-корреспондент РАН;<br>ORCID: 0000-0002-6108-1444;<br>eLibrary SPIN: 5424-2991;<br>e-mail: compcard@mail.ru | **Irina M. Roshchevskaya,** Dr. Sci. (Biology), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences;<br>ORCID: 0000-0002-6108-1444;<br>eLibrary SPIN: 5424-2991;<br>e-mail: compcard@mail.ru |


Accepted for publication

Экология человека | Ekologiya cheloveka (Human Ecology)
Оригинальные исследования | Original study articles
DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643503
EDN: WQWAIA

## ТАБЛИЦЫ

**Таблица 1.** Параметры электрокардиограммы во втором отведении от конечностей и электрического поля сердца, исследуемые в группах

**Table 1.** Electrocardiogram parameters in the second lead from the extremities and the electric field of the heart, studied in groups

| Параметры<br>Parameters | 1-я группа<br>1nd group | 2-я группа<br>2nd group | Значение непарного t-критерий Стьюдента<br>The value of the unpaired Student's t-test | *p* |
|---|---|---|---|---|
| | | *Временные характеристики*<br>*Temporary characteristics* | | |
| J–$T_{peak}$, мс | 230,6±11,6 | 229,0±20,0 | t=0,21, df=23 | 0,83 |
| $T_{peak}$–$T_{end}$, мс | 81,7±2,7 | 82,8±10,4 | t=0,32, df=23 | 0,74 |
| *QT*, мс | 417,7±8,4 | 415,9±29,4 | t=0,063, df=23 | 0,95 |
| $T_{max}$, мс | 246,6±8,2 | 261,8±20,6 | t=2,18, df=23 | 0,039[1] |
| $T_{min}$, мс | 280,6±9,6 | 282,3±17,0 | t=0,93, df=23 | 0,36 |
| | | *Амплитудные характеристики*<br>*Amplitude characteristics* | | |
| *T*, мВ | 0,45±0,24 | 0,43±0,21 | t=0,37, df=23 | 0,71 |
| $A_{max}$, мВ | 0,79±0,08 | 0,83±0,10 | t=0,60, df=23 | 0,55 |
| $A_{min}$, мВ | −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- и 2-й группах на 1- 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 time and amplitude characteristics are indicated in groups with the same SpO2 decrease: in groups 1 and 2 at the 1st and 3rd min of hypoxic exposure, respectively; the values are presented as M ± SD, where M is the arithmetic mean, SD is the standard deviation; 1 is the statistically significant difference between the indicators in the groups (p <0.05); J–Tpeak — interval from point J to the peak of the T–wave; Tpeak—Tend - interval from the peak of the T-wave to its end; Tmax — time to reach a positive extreme; Tmin — time to reach a negative extreme; Amax — positive extreme; Amin is a negative extreme.

Accepted for publication

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

## РИСУНКИ

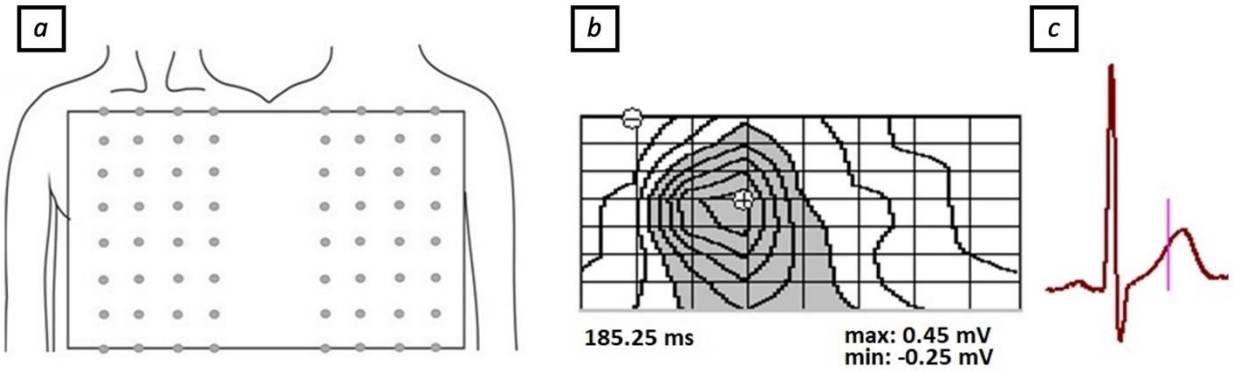


**Рис. 1.** Схема расположения электродов на поверхности грудной клетки человека (*a*) и эквипотенциальная моментная карта распределения кардиоэлектрических потенциалов на поверхности грудной клетки в период реполяризации желудочков сердца (*b*): закрашены области положительных потенциалов; знаки «+» 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.** The scheme of the positions of electrodes on the human torso surface (A) and instantaneous body surface equipotential map of the cardiac potentials distribution on the human torso surface during ventricular repolarization (B). Notes: The area of positive potentials is dark-colored. The signs, "+" and "–", denote the location of the positive and negative extrema, respectively. Below the map, the time relative to the $R_{II}$-wave peak (ms), the $ECG_{II}$ with a time marker (vertical line), and the amplitudes in millivolts (mV) of the positive (max) and negative (min) cardiac potentials are shown. The left part of the map represents the ventral body surface, and the right represents the dorsal body surface.

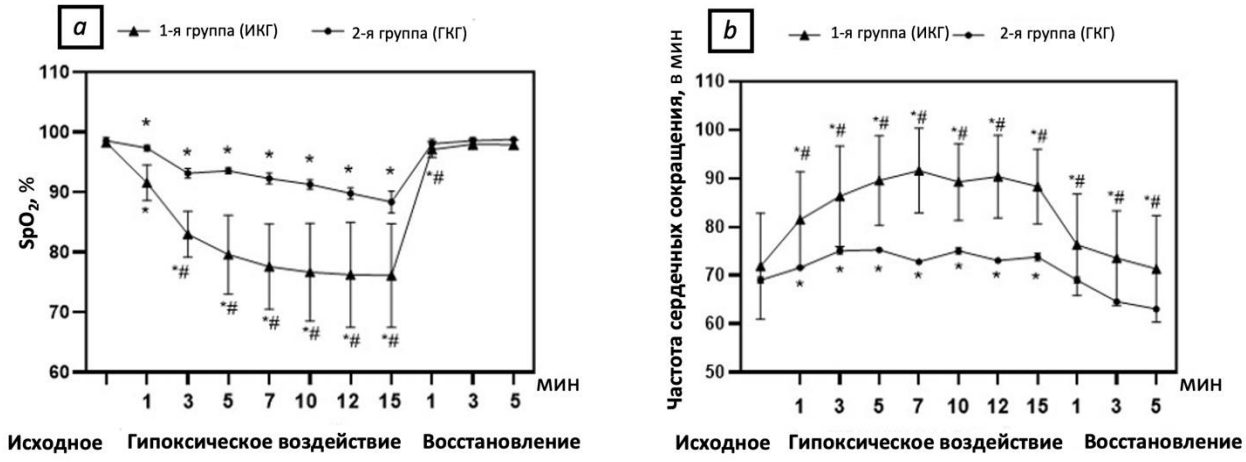


**Рис. 2.** Насыщение крови кислородом (*a*) и частота сердечных сокращений (*b*) при разных видах гипоксического воздействия относительно исходного состояния у участников исследования: * — статистически значимое отличие по сравнению с исходными показателями ($p$ <0,05); # — статистически значимое отличие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

**Fig. 2.** The changes of the HR and blood saturation SpO2 under different types of hypoxic exposure relative to the initial state in the studied subjects Notes: * - statistically significant compared to baseline (p<0,05), # - statistically significant between HH and HCH (p<0,05)

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

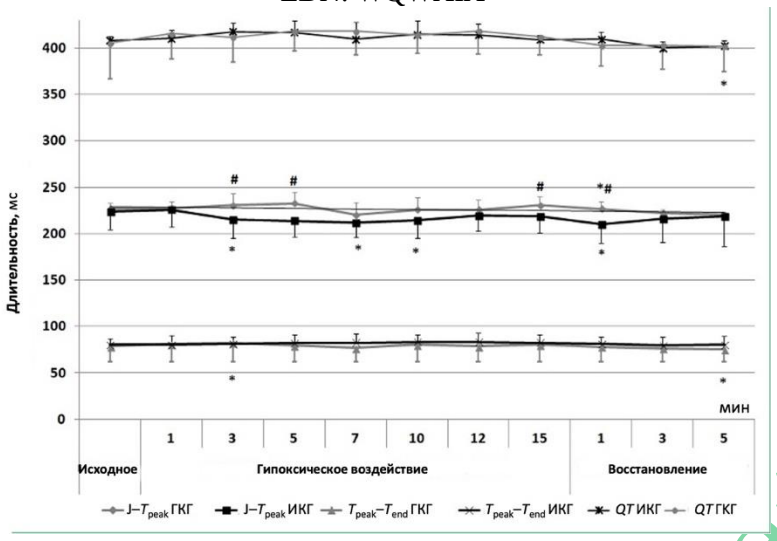


**Рис. 3.** Временные характеристики при разных видах гипоксического воздействия у участников исследования: * — статистически значимое отличие показателя по сравнению с исходным значением при воздействии изокапнической гипоксии ($p$ <0,05); # — статистически значимое отличие показателя по сравнению с 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.** The durations of the corrected QTII, J-TpeakII, Tpeak-TendII intervals under hypoxic exposure in the studied subjects (M±SD) Notes: * - statistically significant compared to baseline under HH (p<0,05), # - statistically significant compared to baseline under HCH (p<0,05)

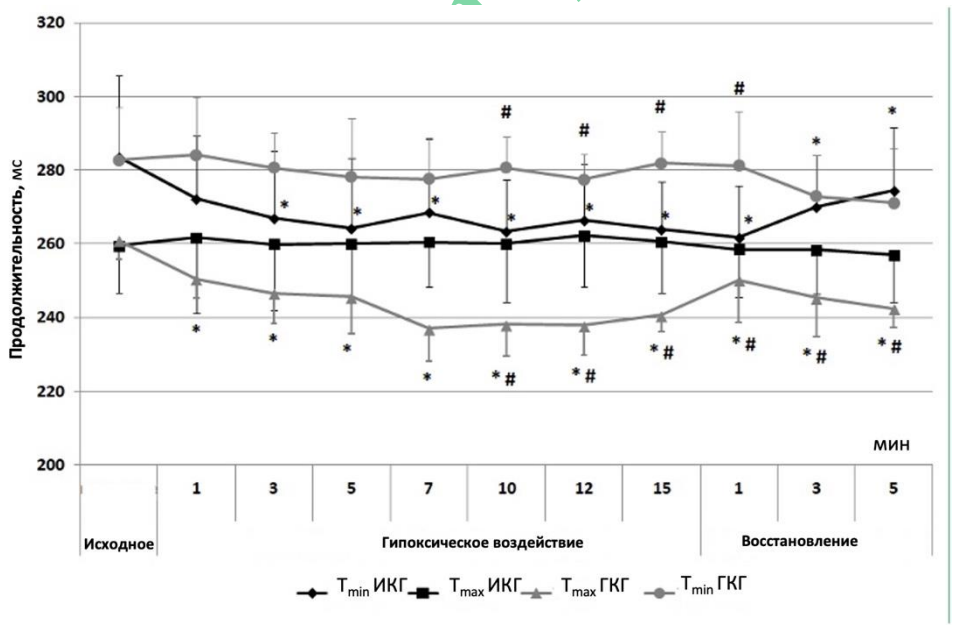


**Рис. 4.** Корригированное время достижения экстремумов электрического потенциала максимальной амплитуды в фазу реполяризации желудочков при различных формах гипоксии: * — статистически значимое изменение показателя по сравнению с исходным значением ($p$ <0,05); ИКГ — изокапническая гипоксия; ГКГ —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

**Fig. 4.** The corrected time when positive and negative extremes reaches the maximum amplitudes (Tmax) and (Tmin) at the period of the ventricular repolarization under different types of hypoxic exposure in the studied subjects (M±m) Notes: * - statistically significant compared to baseline (p<0,05)

Accepted publication