

DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-3-41-57

УДК 612.273.2, 612.146.1



Научная статья | Физиология

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ СЕРДЦА ЧЕЛОВЕКА В ПЕРИОД ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ЖЕЛУДОЧКОВ ПРИ ОСТРОЙ НОРМОБАРИЧЕСКОЙ ГИПОКСИИ

*Е.В. Заменяина, Н.И. Ивонина, И.М. Рощевская*

**Обоснование.** Воздействие острой гипоксии на человека приводит к нарушениям функции сердца, что отражается в увеличении неоднородности процесса деполяризации желудочков, которое сложно установить при использовании традиционной ЭКГ.

**Цель.** Исследование электрической активности сердца на поверхности торса человека в период деполяризации желудочков сердца при воздействии острой нормобарической гипоксии с использованием многоканального ЭКГ-картирования.

**Материал и методы.** Электрическую активность сердца у практически здоровых молодых мужчин ( $20 \pm 1$  лет) исследовали в период деполяризации желудочков в условиях экзогенной острой нормобарической гипоксии методом кардиоэлектротопографии. Регистрировали униполярные ЭКГ от 64 электродов на поверхности грудной клетки, синхронно с биполярными ЭКГ в отведениях от конечностей, проводили оценку амплитуд R и S зубцов на ЭКГ в позиции отведений  $V_1$  и  $V_5$ .

**Результаты.** Выявлено, что при гипоксии по сравнению с исходным состоянием паттерн распределения и пространственно-временная динамика положительных и отрицательных кардиопотенциалов, отражающих на поверхности торса последовательность активации миокарда, существенно не изменились и были характерными для периода начальной желудочковой активности у практически здоровых людей. Выявлено существенное снижение амплитуд максимальных экстремумов кардиоэлектрических потенциалов, амплитуд зубцов SV1 и RV5 при гипоксии: амплитуда максимума снизилась с  $1,88 \pm 0,58$  мВ в исходном состоянии до  $1,83 \pm 0,55$  мВ при гипоксии; минимума – с  $-2,08 \pm 0,76$  мВ до  $-1,85 \pm 0,73$  мВ; зубца  $S_{V1}$  с  $-1,28 \pm 0,25$  мВ до  $-1,17 \pm 0,18$  мВ; зубца  $R_{V5}$  с  $1,21 \pm 0,25$

мВ до  $1,05 \pm 0,29$  мВ, соответственно, при этом длительность деполаризации желудочков статистически значимо не изменилась.

**Заключение.** При гипоксическом воздействии у обследованных людей выявлено значимое снижение амплитуд максимальных экстремумов электрического поля сердца, взаимосвязь изменений амплитуд положительного экстремума и зубца RV5, при практически неизменных длительности деполаризации желудочков и динамики распределения кардиоэлектрических потенциалов.

**Ключевые слова:** кардиоэлектротопография; деполаризация желудочков; гипоксия

**Для цитирования.** Заменина Е.В., Ивонина Н.И., Роцевская И.М. Электрическая активность сердца человека в период деполаризации желудочков при острой нормобарической гипоксии // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2023. Т. 15, №3. С. 41-57. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-3-41-57

Original article | Physiology

## ELECTRICAL ACTIVITY OF THE HUMAN HEART DURING THE PERIOD OF VENTRICULAR DEPOLARIZATION UNDER ACUTE NORMOBARIC HYPOXIA

*E.V. Zamenina, N.I. Ivonina, I.M. Roshchevskaya*

**Background.** The effect of acute hypoxia on the human heart leads to deterioration of the heart function, this is reflected in an increase of the heterogeneity of the depolarization process, which is difficult to reveal when using a traditional ECG.

**Purpose.** To investigate the electrical activity of the heart during the ventricular depolarization on the thorax surface under the exposure of acute normobaric hypoxia using multichannel ECG mapping.

**Material and methods.** The electrical activity of the heart in apparently healthy young men ( $20 \pm 1$  years) was studied during ventricular depolarization under exposure of acute normobaric hypoxia using cardioelectrotopygraphy. Unipolar ECGs were recorded from 64 electrodes on the surface of the chest, simultaneously with bipolar ECGs in limb leads and the amplitudes of R and S waves from the surface electrodes localized in positions  $V_1$  and  $V_5$  of the traditional ECG were evaluated.

**Results.** It was revealed that during hypoxia, in comparison with the initial state, the pattern of distribution and the spatio-temporal dynamics of positive and negative

cardiac potentials reflecting the sequence of myocardial activation on the torso surface did not change significantly and were typical for the period of ventricular depolarization of the healthy person. A decrease in the amplitudes of the maximum extrema of cardiac electric potentials, the amplitudes of the SV1 and RV5 waves at hypoxic exposure was revealed: the amplitude of the maximum decreased from  $1.88 \pm 0.58$  mV in the initial state to  $1.83 \pm 0.55$  mV at hypoxia, the minimum – from  $-2.08 \pm 0.76$  mV to  $-1.85 \pm 0.73$  mV, the  $S_{V1}$  wave from  $-1.28 \pm 0.25$  mV to  $-1.17 \pm 0.18$  mV,  $R_{V5}$  wave from  $1.21 \pm 0.25$  mV to  $1.05 \pm 0.29$  mV, respectively, while the duration of ventricular depolarization did not change statistically significantly.

**Conclusion.** Under hypoxic exposure, the examined persons showed a significant decrease in the amplitudes of the maximum extrema of the electric field of the heart, a direct correlation between changes in the amplitudes of the positive extremum and the RV5 wave, with practically unchanged duration of ventricular depolarization and dynamics of the distribution of cardioelectric potentials.

**Keywords:** cardioelectrotopography; ventricular depolarization; hypoxia

**For citation.** Zamenina E.V., Ivonina N.I., Roshchevskaya I.M. Electrical Activity of the Human Heart During the Period of Ventricular Depolarization under Acute Normobaric Hypoxia. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 41-57. DOI: 10.12731/2658-6649-2023-15-3-41-57

## Введение

Изучение влияния гипоксии на организм человека не утрачивает своей актуальности, поскольку многие нарушения функции сердца напрямую связаны с развитием кислородной недостаточности [2, 5]. Для кардиомиоцитов характерно высокое потребление кислорода, необходимого для образования макроэргических соединений, обеспечивающих активность ионных каналов для образования потенциала действия [20], поэтому при падении парциального давления кислорода в крови изменяются электрофизиологические характеристики миокарда [2; 12]. Гипоксическое состояние повышает неоднородность процесса деполяризации миокарда и увеличивает риски развития жизнеугрожающих аритмий [19]. Использование традиционной ЭКГ в начальном периоде развития гипоксического состояния миокарда недостаточно информативно ввиду разнонаправленности изменений амплитудных критериев деполяризации желудочков у людей с разной толерантностью к гипоксии [2]. Многоканальное поверхностное ЭКГ-картирование продемонстрировало высокую чувствительность и специфичность при различных нарушениях деятельности сердца, его диагностическая и прогностическая ценность подтверждена клиническими исследованиями [10, 21]. Возможность визуализации электрофизиологических процессов при помо-

щи различных активационных карт позволяет выявлять электрическую неоднородность миокарда, его ремоделирование [8, 9, 14].

Изучение электрокардиографической информации от множества точек на поверхности грудной клетки в условиях экзогенной гипоксической гипоксии позволит получить дополнительную информацию о функционировании сердца при ограничении поступления кислорода в организм человека.

**Цель работы** – исследование электрической активности сердца в период деполяризации желудочков при воздействии острой нормобарической гипоксии с использованием многоканального ЭКГ-картирования.

### **Материалы и методы исследования**

В исследовании приняли добровольное участие 6 практически здоровых мужчин (20±1 лет, масса тела 80,7±10,2 кг, длина тела 179,5±6,7 см). Все испытуемые перед началом исследования были ознакомлены с условиями его проведения и дали добровольное письменное согласие на участие. Протокол исследования соответствовал этическим медико-биологическим нормам, изложенным в Хельсинкской декларации, а также был одобрен биоэтическим комитетом отдела сравнительной кардиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (протокол № 1 от 6.04.2022).

Исследование проводили в помещении при температуре воздуха 21-23°C, относительной влажности 55-64 %, барометрическом давлении 740-750 мм рт. ст. Во время исследования обследуемые находились в положении полусидя в кресле. Гипоксическое воздействие (ГВ) осуществляли экзогенно через лицевую маску в течение 15 минут в условиях нормального атмосферного давления с использованием гипоксической газовой смеси (содержание кислорода 12,3%, азота 87,6%, углекислого газа 0,04%), получаемой на кислородном концентраторе «Kröber O<sub>2</sub>» (Германия).

Для контроля состояния испытуемых в исходном состоянии, при ГВ и восстановительном периоде (5 минут дыхания атмосферным воздухом) регистрировали оксигенацию крови (SpO<sub>2</sub>), частоту сердечных сокращений (ЧСС) с помощью пульсоксиметра «Nonin 8500» (США), систолическое и диастолическое артериальное давление (АДсист и АДдиаст) – автоматическим тонометром «OMRON I-Q 142» (Япония).

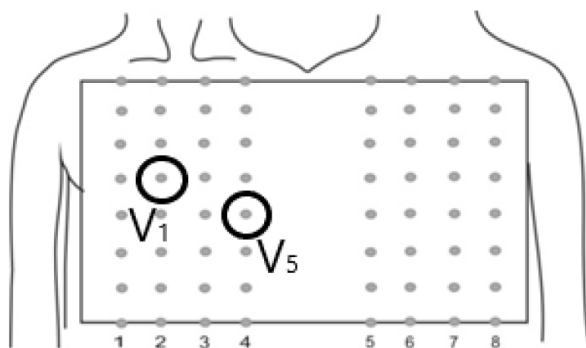
В исходном состоянии, на каждой минуте периодов ГВ и восстановления у обследуемых синхронно с биполярными ЭКГ в отведениях от конечностей (I, II, III) регистрировали униполярные ЭКГ от 64 электродов, расположенных равномерно на торсе, при помощи автоматизированной системы для синхронной многоканальной регистрации [7].

При анализе электрической активности желудочков сердца на ЭКГ во втором отведении от конечностей по трем сердечным кардиоциклам определяли средние длительности комплекса  $QRS_{II}$ .

Параметры электрического поля сердца (ЭПС) в период деполяризации желудочков сердца исследовали по пространственному расположению зон и экстремумов положительных и отрицательных кардиоэлектрических потенциалов (максимума и минимума, соответственно) на эквипотенциальных моментных картах. Значения времени до пика  $R_{II}$  на ЭКГ указывали со знаком минус, после – без знака.

По эквипотенциальным моментным картам анализировали: амплитудные характеристики положительного и отрицательного экстремумов; пространственно-временные изменения ЭПС на поверхности тела (начало и конец формирования ЭПС, характерного для деполяризации желудочков, начало и конец первой и второй инверсий, определяемых как изменения взаимного расположения зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов; длительности деполяризации желудочков и инверсий).

Дополнительно проводили анализ униполярных ЭКГ в отведениях  $V_1$  и  $V_5$ . Ранее было показано [11, 12], что в условиях нормобарической гипоксии значительно изменяются амплитуды зубцов в грудных отведениях  $V_1$  и  $V_5$ , что позволяет использовать их в качестве маркеров изменения электрической активности сердца при экзогенной гипоксии. В настоящем исследовании анализировали амплитуду зубца S в отведении  $V_1$  ( $S_{V_1}$ ), амплитуду зубца R в отведении  $V_5$  ( $R_{V_5}$ ) (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема расположения 64 униполярных электродов на поверхности грудной клетки человека

Примечание. Цифрами 1-8 обозначены ряды, содержащие по 8 отводящих электродов. Черными кружками отмечена локализация отведений  $V_1$  и  $V_5$  традиционной ЭКГ.

Статистическую обработку данных проводили пакетом Statistica 10.0. (StatSoft, USA). Данные представлены в виде средней арифметической  $\pm$  стандартное отклонение. Полученные результаты по критерию Шапиро-Уилка имели нормальное распределение, статистическую значимость различий оценивали t-критерием Стьюдента для двух зависимых выборок «до-после». Корреляцию рассчитывали, используя коэффициент Пирсона, высокой считали связь показателей при значении выше 0,6. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

### **Результаты исследования и их обсуждение**

В исходном состоянии у обследованных людей  $SpO_2$  составила 98 %, ЧСС –  $76 \pm 12$  уд/мин, АД сист –  $125 \pm 9$  мм рт. ст., АДдиаст –  $70 \pm 7$  мм рт. ст.

При воздействии острой нормобарической гипоксии у обследованных выявлено статистически значимое снижение оксигенации крови до  $77 \pm 8$  % (на 11 мин. ГВ) и увеличение ЧСС до  $95 \pm 8$  уд/мин (на 7 мин. ГВ) по сравнению с исходным состоянием ( $p < 0,05$ ), незначительное уменьшение АД сист и АД диаст. В период 5-минутного восстановления все гемодинамические показатели восстановились до исходного уровня.

У всех обследованных людей в исходном состоянии и в конце ГВ характер динамики смещения зон и экстремумов положительных и отрицательных кардиопотенциалов на ЭПС в период деполяризации желудочков был однотипным (рис. 2).

Для начала формирования ЭПС, типичного для деполяризации желудочков сердца (рис. 2-1), характерно появление небольшой по площади зоны и экстремума положительных потенциалов на вентральной части грудной клетки в области грудины, на фоне всей остальной поверхности торса с экстремумом отрицательных кардиопотенциалов. В период восходящей части зубца  $R_{II}$  на ЭПС у всех обследованных людей происходила первая инверсия взаимного расположения зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов ЭПС (рис. 2-2). Во время инверсии положительный экстремум и зона, занимающие к тому моменту всю вентральную сторону торса смещались вниз, к нижней части грудной клетки, и влево, отрицательный экстремум и зона переходили с дорсальной стороны на вентральную через правое плечо. В период нисходящей фазы  $RS_{II}$  происходила вторая инверсия взаимного расположения зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов (рис. 2-4) на ЭПС у всех обследованных лиц. Область положительных кардиоэлектрических потенциалов с экстремумом перемещались через леволатеральную поверхность торса на спину, отрицательная область с экстремумом смещались к нижней части грудной клетки и занимали к окончанию инверсии всю вентральную сторону.

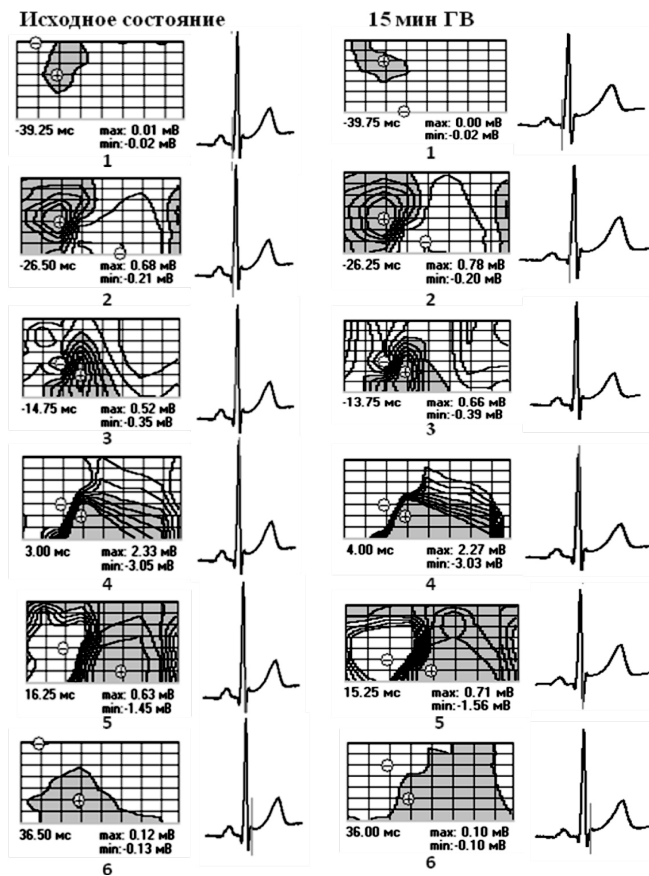


Рис. 2. Эквипотенциальные моментные карты

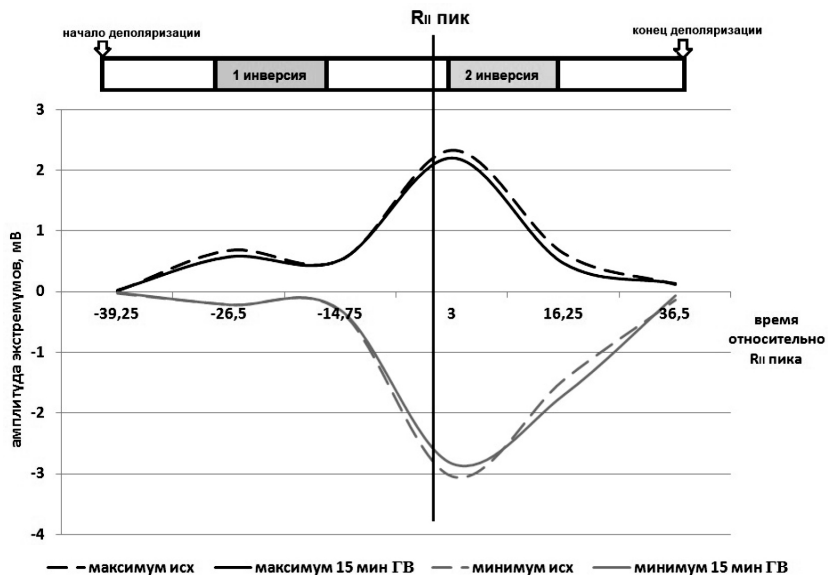
электрического поля сердца в период деполаризации желудочков на поверхности грудной клетки обследованного М.П. в исходном состоянии и на 15 минуте гипоксического воздействия

1 – начало формирования ЭПС, характерного для периода деполаризации желудочков сердца, 2 – начало первой инверсии; 3 – окончание первой инверсии; 4 – начало второй инверсии; 5 – окончание второй инверсии; 6 – окончание деполаризации желудочков сердца.

Примечание. Закрашены области положительных кардиопотенциалов. Знаки «+» и «-» обозначают положение положительного и отрицательного экстремумов, соответственно. Под каждой картой указано время в мс относительно пика зубца  $R_{II}$ , справа приведена ЭКГ<sub>II</sub> с маркером времени (вертикальная черта), указаны максимальная амплитуда положительного и отрицательного кардиопотенциалов. Шаг изолиний равен 0,1 мВ.

У половины исследуемых к окончанию второй инверсии положительные кардиопотенциалы располагались и краниально на вентральной стороне, занимая область ключиц. Окончание деполяризации желудочков сердца (рис. 2-6) обследованных людей отражалось на ЭПС постепенным уменьшением зоны положительных кардиопотенциалов с одновременным уменьшением амплитуд положительного и отрицательного экстремумов.

Сопоставление динамики амплитуд экстремумов при изменении расположения зон на ЭПС на грудной клетке обследованных позволило выявить основные характеристики нарастания потенциала максимума и минимума в различные периоды деполяризации желудочков (Рис. 3).



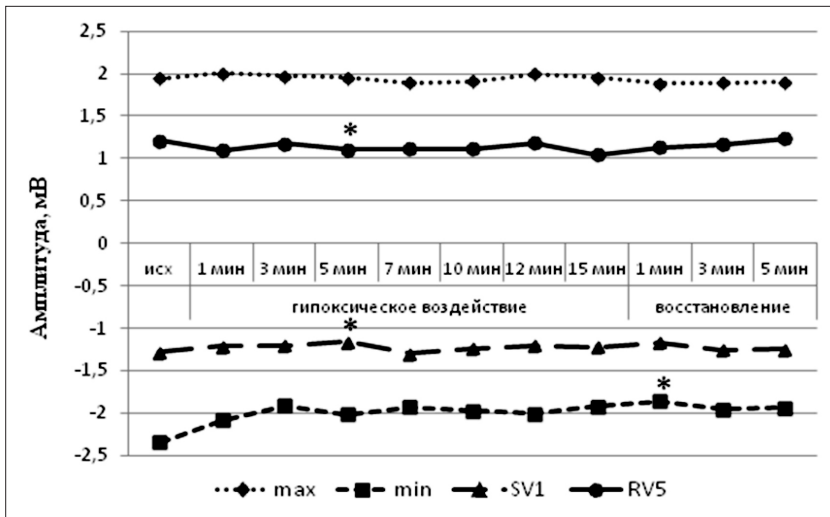
**Рис. 3.** Динамика амплитуд максимума и минимума и пространственные характеристики электрического поля сердца (инверсии) в период деполяризации желудочков на поверхности грудной клетки у обследованного М.П. в исходном состоянии и на 15 минуте гипоксического воздействия

В начальный период активации желудочков, в период первой инверсии областей кардиоэлектрических потенциалов, амплитуды максимума и минимума ЭПС на поверхности торса увеличивались постепенно и незначительно. После первой инверсии областей кардиоэлектрических потенциалов к моменту пика зубца R<sub>II</sub> амплитуды обоих экстремумов выросли



до 1,8-2,6 мВ. Однако максимальные величины максимума и минимума (2,5-3,35 мВ) были отмечены после пика зубца  $R_{II}$  (на  $1,2 \pm 0,6$  мс), во время второй инверсии зон ЭПС. После этого потенциал экстремумов снижался быстро, дойдя до минимальных значений в 0,01-0,03 мВ еще до завершения комплекса QRS.

Показана динамика изменения амплитуд положительного и отрицательного экстремумов ЭПС и амплитуд положительного и отрицательного потенциала в грудных отведениях  $V_1$  и  $V_5$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Амплитуды положительного и отрицательного экстремумов (max и min), SV1, RV5 в исходном состоянии (исх), при гипоксическом воздействии (1-15 мин) и восстановлении (1-5 мин)  
\* - статистическая значимость различий ( $p < 0,05$ ) по сравнению с исходным состоянием

Выявлено снижение амплитуд максимума, минимума,  $S_{V1}$ ,  $R_{V5}$  относительно исходного состояния с первой по 10 минуту ГВ. Максимально уменьшилась амплитуда  $S_{V1}$ ,  $R_{V5}$  на пятой минуте ГВ ( $p < 0,05$ ), а положительного и отрицательного экстремумов – на 7 минуте ГВ. В восстановительный период амплитуда экстремумов не возвратилась к исходному уровню, амплитуда  $S_{V1}$ ,  $R_{V5}$  восстановилась.

Выявлена положительная статистически значимая корреляция между амплитудами максимума и  $R_{V5}$  в исходном состоянии, на третьей и седьмой минутах ГВ и в период восстановления (табл.).

Таблица.

**Показатели корреляции Пирсона между амплитудами максимума и  $R_{Vs}$  у обследованных людей в исходном состоянии, при гипоксическом воздействии и в период восстановления дыханием атмосферным воздухом**

Показатели	Исходное состояние	Гипоксическое воздействие							Восстановление		
		1 мин	3 мин	5 мин	7 мин	10 мин	12 мин	15 мин	1 мин	3 мин	5 мин
<b>r</b>	0,878	0,633	0,846	0,784	0,845	0,769	0,780	0,617	0,947	0,810	0,946
<b>p</b>	0,022	0,177	0,034	0,065	0,034	0,074	0,067	0,192	0,004	0,05	0,004

Примечание. r – корреляционная связь, p – уровень значимости.

Корреляции между амплитудами минимума и  $S_{V1}$  не выявлено в исходном состоянии и при ГВ.

Длительность комплекса QRS в исходном состоянии составила  $0,084 \pm 0,003$  с, длительность деполяризации желудочков сердца –  $0,077 \pm 0,004$  с. При ГВ у обследованных людей не выявлены значимые изменения длительностей комплекса  $QRS_{II}$  и деполяризации желудочков сердца по ЭПС по сравнению с исходным состоянием.

В результате анализа пространственных характеристик ЭПС на поверхности грудной клетки обследованных людей в период деполяризации желудочков сердца выявлено, что формирование и характер движения зон положительных и отрицательных кардиопотенциалов при ГВ не отличаются от исходного состояния.

На эквивалентных моментных картах ЭПС в начале комплекса QRS положительный экстремум появляется в верхней или средней части грудной клетки, а отрицательный экстремум обычно находится в нижней части левой грудной стенки или сзади, что может быть связано с септальным возбуждением, которое возникает преимущественно слева направо, а также с активацией свободной стенки правого желудочка [13]. Позже минимум переходит на дорсальную поверхность грудной клетки, отмечают начало первой инверсии кардиопотенциалов, отражающей изменение основного направления фронта волны возбуждения в верхушечной трети желудочков сердца и прорыв деполяризации на эпикард желудочков. Вторая инверсия кардиоэлектрических потенциалов связана с изменением направления волны возбуждения к основанию желудочков и возбуждением основной массы миокарда [6]. Таким образом, динамика смещения зон и экстремумов кардиоэлектрических потенциалов в период деполяризации желудочков сердца на поверхности тела здорового человека [9, 13] харак-

терна и для обследованных нами людей в исходном состоянии. Экзогенная кратковременная гипоксия не привела к существенным изменениям распределения кардиоэлектрических потенциалов на поверхности торса у обследованных, сохранилась последовательность и временные характеристики движения областей положительных и отрицательных потенциалов относительно друг друга в период деполяризации желудочков сердца.

Ранее в исследованиях на животных и человеке показано, что изменения амплитудно-временных характеристик электрического поля отражает функциональные сдвиги в работе сердца. Предполагают, что при сохранении общей длительности процесса возбуждения изменение характеристик экстремумов указывает на изменение внутренней структуры деполяризации в сердце [17]. Большинство исследователей указывает на то, что умеренная экзогенная гипоксия не изменяет длительность комплекса  $QRS_{II}$  [1, 11, 12], в настоящем исследовании продолжительность периода деполяризации желудочков практически не изменялась на всем протяжении гипоксического воздействия.

Несмотря на кратковременность экзогенной гипоксии анализ динамики амплитуд положительного и отрицательного экстремумов ЭПС на поверхности торса обследованных людей показал уменьшение их абсолютных значений, при этом выявлена взаимосвязь с изменением амплитуды  $R_{V_5}$ , без корреляции с величиной зубца  $S_{V_1}$ . Использование амплитуды  $R_{V_5}$  и  $S_{V_1}$  как маркеров оценки процесса деполяризации желудочков в гипоксических условиях по замечанию самих авторов [12] обосновано при выраженной тканевой гипоксемии. В таких условиях происходит снижение амплитуды потенциала действия кардиомиоцитов [3, 15, 16], обусловленных снижением активности кислородзависимых мембранных каналов клеток сердца [18]. Начальные же изменения функции клеток сердца при кислородной недостаточности могут не сопровождаться изменениями электрофизиологических параметров в период деполяризации желудочков. Исследование процесса реполяризации миокарда человека при гипоксическом воздействии [4] показало, что на фоне отсутствия значимых изменений ЭКГ в стандартных отведениях функциональные изменения в сердце отразились в увеличении временных характеристик экстремумов кардиопотенциалов на поверхности тела, что демонстрирует высокую чувствительность метода кардиоэлектротопографии и его перспективу в оценке начальных изменений электрической активности сердца при воздействии стресс-факторов.

Нами показано, что снижение амплитуды положительного экстремума ЭПС, коррелирующее со снижением амплитуды зубца  $R_{V_5}$  при кратковременной экзогенной гипоксии, может стать критерием оценки изменений элек-

трофизологии миокарда при использовании многоканального картирования потенциалов сердца на поверхности торса. Отсутствие взаимосвязи изменения максимального отрицательного кардиопотенциала с амплитудой  $S_{V_1}$  дает основания предполагать, что кратковременность и невысокая выраженность гипоксического воздействия отразилась в разнонаправленности изменения S зубца в правых отведениях у обследованных людей и его применение для оценки ГВ на процесс деполяризации желудочков нецелесообразно.

### **Заключение**

Таким образом, кардиоэлектротопографическое исследование деполяризации желудочков практически здоровых людей при воздействии кратковременной экзогенной гипоксии позволило выявить при практически неизменных длительности деполяризации желудочков и динамики распределения кардиоэлектрических потенциалов, значимое снижение амплитуд максимальных экстремумов электрического поля сердца. Детализация процесса деполяризации миокарда желудочков при применении множественного картирования кардиопотенциалов сердца на поверхности торса при гипоксии показала значимую взаимосвязь изменений максимальных амплитуд кардиопотенциалов с величиной  $R_{V_5}$ , при отсутствии таковой с  $S_{V_1}$ , что позволяет предложить применение кардиоэлектротопографических параметров в качестве маркеров при оценке начальных изменений функционального состояния сердца в гипоксических условиях.

### **Список литературы**

1. Бочаров М.И., Шилов А.С. Организация биоэлектрических процессов сердца при разной степени острой нормобарической гипоксии у здоровых людей // Экология человека. 2020. Т. 27, № 12. С. 28-36. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-12-28-36>
2. Горанчук В.В., Сапова Н.И., Иванов А.О. Гипокситерапия. Санкт-Петербург: Элби-СПб, 2003. 536 с.
3. Гришин О.В., Басалаева С.В., Устюжанинова Н.В., и др. Реакции внешнего дыхания и интенсивность энергетического обмена у не адаптированных к гипоксии людей в условиях нарастающей гипоксии // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2014. Вып. 51. С. 8-14.
4. Заменина Е.В., Пантелеева Н.И., Рощевская И.М. Электрическое поле сердца человека в период реполяризации желудочков при острой нормобарической гипоксии до и после курса интервальной гипоксической тренировки // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 48. С. 115-134. <https://doi.org/10.17223/19988591/48/6>

5. Колчинская А.З. Интервальная гипоксическая тренировка в спорте высших достижений // Спортивная медицина. 2008. № 1. С. 9-24.
6. Рощевская И.М. Кардиоэлектрическое поле теплокровных животных и человека. СПб: Наука, 2008. 250 с.
7. Рощевский М.П., Артеева Н.В., Коломеец Н.Л., и др. Система «Кардиоинформ» для визуализации и анализа кардиологического поля // Медицинский академический журнал. 2005. Т. 5, № 3. С. 74-79.
8. Феофанова Т.Б., Полякова И.П., Залетова Т.С. Диагностические возможности поверхностного ЭКГ-картирования в оценке состояния миокарда при сопутствующей блокаде левой ножки пучка гиса // Современные проблемы науки и образования. 2020. № 4. <https://doi.org/10.17513/spno.30003>
9. Bergquist J., Rupp L., Zenger B., et. al. Body Surface Potential Mapping: Contemporary Applications and Future Perspectives // *Hearts*. 2021. No. 2. P. 514-542. <https://doi.org/10.3390/hearts2040040>
10. Bond R., Finlay D., Nugent C., et. al. Methods for presenting and visualising electrocardiographic data: From temporal signals to spatial imaging // *J Electrocardiol*. 2013. Vol. 46, no. 3. P. 182-196. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2013.01.008>
11. Carta A.F., Bitos K., Furian M., et. al. ECG changes at rest and during exercise in lowlanders with COPD travelling to 3100 m // *Int J Cardiol*. 2021. Vol. 324. P. 173-179. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2020.09.055>
12. Coustet B., Lhuissier F.J., Vincent R., et. al. Electrocardiographic changes during exercise in acute hypoxia and susceptibility to severe high-altitude illnesses // *Circulation*. 2015. Vol. 131, no 9. P. 786-794. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.013144>
13. De Ambroggi L., Corlan A.D. Body Surface Potential Mapping. In: *Comprehensive Electrocardiology*. Springer Verlag. London Limited. 2011. Vol. 3. P. 1375-1415. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-046-3>
14. Jia P. Understanding unipolar electrograms and global activation from noninvasive mapping for diagnosing arrhythmias // *J Electrocardiol*. 2019. Vol. 57S. P. 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.09.011>
15. Kane G.C, Liu X.K., Yamada S., et al. Cardiac KATP channels in health and disease // *J Mol Cell Cardiol*. 2005. Vol. 38, no 6. P. 937-943. <https://doi.org/10.1016/j.yjmcc.2005.02.026>
16. Li Y., Gao J., Lu Z., et al. Intracellular ATP binding is required to activate the slowly activating K<sup>+</sup> channel I (K<sub>s</sub>) // *Proc Natl Acad Sci USA*. 2013. Vol. 110, no. 47. P. 18922-18927. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315649110>
17. Mirvis D. Body surface distribution of exercise-induced QRS changes in normal subjects // *Am J Cardiol*. 1980. Vol. 46, no. 6. P. 988-996. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(80\)90356-2](https://doi.org/10.1016/0002-9149(80)90356-2)

18. Ronchi C., Torre E., Rizzetto R., et al. Late sodium current and intracellular ionic homeostasis in acute ischemia // *Basic Res Cardiol*. 2017. Vol. 112, no. 2. P. 12. <https://doi.org/10.1007/s00395-017-0602-9>
19. Salameh A., Zöbisch H., Schröder B., et. al. Effects of Hypoxia and Acidosis on Cardiac Electrophysiology and Hemodynamics. Is NHE-Inhibition by Cariporide Still Advantageous? // *Front Physiol*. 2020. Vol. 11, 224. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00224>
20. Shimoda L.A., Polak J. Hypoxia. 4. Hypoxia and ion channel function // *Am J Physiol Cell Physiol*. 2011. Vol. 300, no. 5 P. 951-967. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00512.2010>
21. Treshkur T., Panova E., Chmelevsky M., et. al. Determination of genesis and localization of ventricular ectopic focus in a patient with coronary artery disease // *Exp Clin Cardiol*. 2014. Vol. 20, no. 8. P. 2388-2394.

### *References*

1. Bocharov M.I., Shilov A.S. Organizatsiya bioelektricheskikh protsessov serdtsa pri raznoi stepeni ostroi normobaricheskoi gipoksii u zdorovykh lyudei [Organization of bioelectrical processes of the heart in different degrees of acute normobaric hypoxia in healthy people]. *Ekologiya cheloveka* [Human ecology], 2020, vol. 27, no. 12, pp. 28-36. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2020-12-28-36>
2. Goranchuk V.V., Sapova N.I., Ivanov A.O. *Gipoksiterapiya* [Hypoxic therapy]. Sankt-Peterburg: Elbi – SPb, 2003, 536 p.
3. Grishin O.V., Basalaeva S.V., Ustyuzhaninova N.V., et al. Reaktsii vneshnego dykhaniya i intensivnost' energeticheskogo obmena u ne adaptirovannykh k gipoksii lyudei v usloviyakh narastayushchei gipoksii [Reactions of external respiration and the intensity of energy metabolism in people not adapted to hypoxia in conditions of increasing hypoxia]. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya* [Bulletin of Physiology and Pathology of Respiration], 2014, iss. 51, pp. 8-14.
4. Zamenina E.V., Panteleeva N.I., Roshchevskaya I.M. Elektricheskoe pole serdtsa cheloveka v period repolyarizatsii zheludochkov pri ostroi normobaricheskoi gipoksii do i posle kursa interval'noi gipoksicheskoi trenirovki [Electric field of the human heart during ventricular repolarization in acute normobaric hypoxia before and after a course of interval hypoxic training]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* [Bulletin of Tomsk State University. Biology], 2019, no 48, pp. 115-134. <https://doi.org/10.17223/19988591/48/6>
5. Kolchinskaya A.Z. Interval'naya gipoksicheskaya trenirovka v sporte vysshikh dostizhenii [Interval hypoxic training in elite sports]. *Sportivnaya meditsina* [Sports medicine], 2008, no. 1, pp. 9-24.

6. Roshchevskaya I.M. *Kardioelektricheskoe pole teplokrovnykh zhivotnykh i cheloveka* [Cardioelectric field of warm-blooded animals and humans]. Sankt-Peterburg: Nauka, 2008, 250 p.
7. Roshchevskii, M.P., Arteeva N.V., Kolomeets N.L., et al. Sistema «Kardioinform» dlya vizualizatsii i analiza kardiologicheskogo polya [Kardioinform system for visualization and analysis of the cardiac field]. *Meditsinskii akademicheskii zhurnal* [Medical academic journal], 2005, vol. 5, no. 3, pp. 74-79.
8. Feofanova T.B., Polyakova I.P., Zaletova T.S. Diagnosticheskie vozmozhnosti poverkhnostnogo EKG-kartirovaniya v otsenke sostoyaniya miokarda pri soputstvuyushchei blokade levoi nozhki puchka gisa [Diagnostic capabilities of surface ECG mapping in assessing the state of the myocardium with concomitant blockade of the left bundle branch block]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2020, no. 4. <https://doi.org/10.17513/spno.30003>
9. Bergquist J., Rupp L., Zenger B., et. al. Body Surface Potential Mapping: Contemporary Applications and Future Perspectives. *Hearts.*, 2021, no. 2, pp. 514-542. <https://doi.org/10.3390/hearts2040040>
10. Bond R., Finlay D., Nugent C., et. al. Methods for presenting and visualising electrocardiographic data: From temporal signals to spatial imaging. *J Electrocardiol.*, 2013, vol. 46, no. 3, pp. 182-196. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2013.01.008>
11. Carta A.F., Bitos K., Furian M., et. al. ECG changes at rest and during exercise in lowlanders with COPD travelling to 3100 m. *Int J Cardiol.*, 2021, vol. 324, pp. 173-179. doi: 10.1016/j.ijcard.2020.09.055
12. Coustet B., Lhuissier F.J., Vincent R., et. al. Electrocardiographic changes during exercise in acute hypoxia and susceptibility to severe high-altitude illnesses. *Circulation*, 2015, vol. 131, no. 9, pp. 786-794. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.114.013144>
13. De Ambroggi L., Corlan A.D. Body Surface Potential Mapping. In: *Comprehensive Electrocardiology*. Springer Verlag. London Limited, 2011, vol. 3, pp. 1375-1415. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-046-3>
14. Jia P. Understanding unipolar electrograms and global activation from noninvasive mapping for diagnosing arrhythmias. *J Electrocardiol.*, 2019, vol. 57S, pp. 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.09.011>
15. Kane G.C, Liu X.K., Yamada S., et al. Cardiac KATP channels in health and disease. *J Mol Cell Cardiol.*, 2005, vol. 38, no. 6, pp. 937-943. <https://doi.org/10.1016/j.yjmcc.2005.02.026>
16. Li Y., Gao J., Lu Z., et al. Intracellular ATP binding is required to activate the slowly activating K<sup>+</sup> channel I (K<sub>s</sub>). *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, vol. 110, no. 47, pp. 18922-18927. <https://doi.org/10.1073/pnas.1315649110>

17. Mirvis D. Body surface distribution of exercise-induced QRS changes in normal subjects. *Am J Cardiol.*, 1980, vol. 46, no. 6, pp. 988-996. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(80\)90356-2](https://doi.org/10.1016/0002-9149(80)90356-2)
18. Ronchi C., Torre E., Rizzetto R., et al. Late sodium current and intracellular ionic homeostasis in acute ischemia. *Basic Res Cardiol.*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 12. <https://doi.org/10.1007/s00395-017-0602-9>
19. Salameh A., Zöbisch H., Schröder B., et. al. Effects of Hypoxia and Acidosis on Cardiac Electrophysiology and Hemodynamics. Is NHE-Inhibition by Cariporide Still Advantageous? *Front Physiol.*, 2020, vol. 11, 224. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00224>
20. Shimoda L.A., Polak J. Hypoxia. 4. Hypoxia and ion channel function. *Am J Physiol Cell Physiol.*, 2011, vol. 300, no. 5, pp. 951-967. <https://doi.org/10.1152/ajpcell.00512.2010>
21. Treshkur T., Panova E., Chmelevsky M., et. al. Determination of genesis and localization of ventricular ectopic focus in a patient with coronary artery disease. *Exp Clin Cardiol.*, 2014, vol. 20, no. 8. pp. 2388-2394.

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

The authors contributed equally to this article.

### **ДАнные ОБ АВТОРАХ**

**Заменина Елена Всеволодовна**, младший научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского  
отделения Российской академии наук»*

*ул. Коммунистическая, 24, г. Сыктывкар, 167982, Российская Фе-  
дерация*

*e.mateva@mail.ru*

**Ивонина Наталья Ивановна**, к.б.н., научный сотрудник

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Фе-  
деральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского  
отделения Российской академии наук»*

*ул. Коммунистическая, 24, г. Сыктывкар, 167982, Российская Фе-  
дерация*

*bdr13@mail.ru*



**Рощевская Ирина Михайловна**, член-корреспондент РАН, д.б.н., профессор, главный научный сотрудник  
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральний исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук»*  
ул. Коммунистическая, 24, г. Сыктывкар, 167982, Российская Федерация  
compcard@mail.ru

#### DATA ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Zamenina**, Junior Researcher

*Komi science centre of the Ural branch of the Russian academy of sciences*  
24, Kommunisticheskaja Str., Syktyvkar, 167982, Russian Federation  
e.mateva@mail.ru  
SPIN-code: 2894-6435  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3438-6365>  
ResearcherID: J-3850-2018  
Scopus Author ID: 57214315485

**Natalya I. Ivonina**, Cand. Sci. (Biol.), Researcher

*Komi science centre of the Ural branch of the Russian academy of sciences*  
24, Kommunisticheskaja Str., Syktyvkar, 167982, Russian Federation  
bdr13@mail.ru  
SPIN-code: 8667-3261  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5802-3753>  
ResearcherID: J-5096-2018  
Scopus Author ID: 56467874100

**Irina M. Roshchevskaya**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher

*Komi science centre of the Ural branch of the Russian academy of sciences*  
24, Kommunisticheskaja Str., Syktyvkar, 167982, Russian Federation  
compcard@mail.ru  
SPIN-code: 5424-2991  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6108-1444>  
ResearcherID: J-2185-2018  
Scopus Author ID: 6507951045

Поступила 08.12.2022

После рецензирования 19.12.2022

Принята 25.12.2022

Received 08.12.2022

Revised 19.12.2022

Accepted 25.12.2022