

Биоэлектрический импеданс и морфометрия левого желудочка сердца крыс после физических нагрузок разной длительности

Н.Л. Коломеец, А.Г. Ивонин, А.С. Гуляева, И.М. Рощевская

Коми научный центр УрО РАН

167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 24

Резюме

Регулярные физические упражнения вызывают морфофункциональные изменения сердца в зависимости от нагрузки. Целью исследования было выявить изменения показателей биоимпедансной спектроскопии левого желудочка сердца у крыс после физических нагрузок (плавания) разной длительности. **Материал и методы.** Выполнена морфологическая и биоимпедансная оценка левого желудочка сердца у самцов крыс, прошедших 12-недельный курс плавания, и у интактных животных. Плавание (5 раз в неделю) подвергали две группы крыс: опытную (по 200 минут в день) и контрольную (по 5 минут в день). **Результаты и их обсуждение.** Гистологическими исследованиями показано увеличение диаметра кардиомиоцитов в левом желудочке сердца у животных опытной и контрольной групп в сравнении с интактными крысами. У животных, подвергавшихся длительной физической нагрузке, выявлено значимое увеличение реактивного сопротивления биоэлектрического импеданса левого желудочка сердца при частоте электрического тока 50 кГц по сравнению с плававшими по пять минут в день, указывающее на большие изменения объема мышечной ткани. Отмечено увеличение активного сопротивления биоэлектрического импеданса левого желудочка сердца наряду с меньшим объемом соединительной ткани у крыс опытной группы в сравнении с контрольными. Амплитуда биоэлектрического импеданса миокарда левого желудочка сердца у крыс опытной группы была больше, чем у животных контрольной (при 30 и 50 кГц) и интактной (при 100 кГц) групп, что указывает на различия в объеме межклеточного и внутриклеточного пространства. **Заключение.** У крыс под воздействием длительных физических нагрузок плаванием в течение 12 недель выявлены морфометрические и биоимпедансные изменения левого желудочка сердца, связанные с физиологическим ремоделированием миокарда.

Ключевые слова: биоимпеданс миокарда, плавание, принудительные тренировки, ремоделирование левого желудочка сердца.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания по плану НИР № 125012300706-7.

Автор для переписки. Коломеец Н.Л., e-mail: kolomeec@frc.komisc.ru

Для цитирования. Коломеец Н.Л., Ивонин А.Г., Гуляева А.С., Рощевская И.М. Биоэлектрический импеданс и морфометрия левого желудочка сердца крыс после физических нагрузок разной длительности. *Сиб. науч. мед. ж.* 2025;45(3):112–119. doi: 10.18699/SSMJ20250312

Bioelectrical impedance of the left ventricle of the rat heart during physical exercise of different durations

N.L. Kolomeyets, A.G. Ivonin, A.S. Gulyaeva, I.M. Roshchevskaya

Komi Science Centre of UrB RAS

167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya st., 24

Abstract

Regular physical exercise causes morphofunctional changes in the heart depending on the load. The aim of our study was to identify changes in the bioimpedance spectroscopy parameters of the left ventricle of the heart in rats after physical exercise (swimming) of different duration. **Material and methods.** Morphological and bioimpedance assessment of the left ventricle of the heart was performed in male rats that underwent a 12-week swimming course and in intact animals. Two groups of rats were subjected to swimming (5 times a week): the experimental (200 minutes a day) and

the control (5 minutes a day). **Results and discussion.** Histological studies have shown an increase in the diameter of cardiomyocytes in the left ventricle of the heart in animals of the experimental and control groups compared to intact rats. In animals subjected to prolonged physical exercise, a significant increase in the reactance of the bioelectrical impedance of the left ventricle of the heart at an electric current frequency of 50 kHz was revealed compared to those swimming for five minutes a day, indicating greater changes in muscle tissue volume. An increase in the active resistance of the bioelectrical impedance of the left ventricle of the heart was noted along with a smaller volume of connective tissue in the rats of the experimental group compared to the control. The amplitude of the bioelectrical impedance of the myocardium of the left ventricle of the heart in rats of the experimental group was greater than in animals of the control (at 30 and 50 kHz) and intact (at 100 kHz) groups, which indicates differences in the volume of intercellular and intracellular space. **Conclusions.** In rats under the influence of prolonged physical exercise by swimming for 12 weeks, morphometric and bioimpedance changes in the left ventricle of the heart associated with physiological remodeling of the myocardium were revealed.

Key words: myocard bioimpedance, swimming, forced training, left ventricular remodeling.

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

Financing. The work was carried out within the framework of the State assignment according to the research plan No. 125012300706-7

Correspondence author. Kolomeyets N.L., e-mail: kolomeec@frc.komisc.ru

Citation. Kolomeyets N.L., Ivonin A.G., Gulyaeva A.S., Roshchevskaya I.M. Bioelectrical impedance of the left ventricle of the rat heart during physical exercise of different durations. *Sibirskij nauchnyj medicinskij zhurnal = Siberian Scientific Medical Journal*. 2025;45(3):112–119. [In Russian]. doi: 10.18699/SSMJ20250312

Введение

Физические упражнения являются эффективными способами снижения риска сердечно-сосудистых заболеваний. Влияние физических нагрузок на функцию и структуру сердца в зависимости от интенсивности и продолжительности моделируется при исследованиях на животных [1]. Интенсивные длительные физические нагрузки могут способствовать увеличению массы сердца, сохраняя или улучшая его функцию [2] или приводить к повреждениям кардиомиоцитов, увеличению фиброза в миокарде [3].

Биоимпедансные оценки объема внутриклеточной и внеклеточной жидкости, мышечной массы используются для оценки эффективности режима тренировок и производительности у спортсменов [4]. При локальном измерении биоимпеданс чувствителен к изменениям в мышцах, происходящим во время физических упражнений, однако недостаточно проведено биоимпедансных исследований, связанных с адаптацией мышц к физическим нагрузкам [5]. Биоимпедансные характеристики миокарда зависят от объема сердца, толщины стенок желудочков [6], состояния внеклеточного и внутриклеточного пространства [7], наличия эпикардальной жировой ткани [8]. Приведет ли физиологическое ремоделирование левого желудочка (ЛЖ) сердца, вызванное регулярной физической нагрузкой, к изменениям биоимпеданса, измеряемого с его поверхности, остается под вопросом. Прямые измерения биоимпеданса миокарда позволяют оценить влияние

физических нагрузок разной длительности на сердце.

Цель работы – выявить изменения показателей электроимпедансной спектроскопии ЛЖ сердца у крыс после физических нагрузок (плавание) разной длительности.

Материал и методы

Исследования проведены в весенне-летний период на самцах крыс линии Вистар (21 особь, возраст 3 мес., масса тела 136 [125; 155] г), полученных из питомника лабораторных животных (УНУ «Научная коллекция экспериментальных животных» ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия). Все выполненные процедуры соответствовали этическим стандартам, утвержденным правовыми актами РФ, рекомендациям комиссии по биоэтике Отдела сравнительной кардиологии ФИЦ «Коми научный центр УрО РАН», директиве Европейского сообщества (86/609/ЕЕС), Хельсинкской декларации «Правила проведения работ с использованием экспериментальных животных».

Крысы были рандомизированы на три группы: опытную ($n = 9$), контрольную ($n = 8$) и интактную ($n = 4$). Животные опытной группы плавали по пять дней в неделю в течение 12 недель. Для формирования гипертрофии миокарда, вызванной долговременной тренировкой плаванием, использовали протокол, описанный ранее [9]. Для адаптации животных продолжительность плавания увеличивали на 15 мин каждый второй трени-

ровочный день с исходных 15 мин в первый день до достижения максимальной – 200 мин в день. Крысы контрольной группы плавали по 5 мин в день 5 раз в неделю на протяжении 12 недель. В отличие от используемого протокола нами введена интактная группа, животные из которой не плавали. Тренировки плаванием проводили путем помещения крыс в резервуар (50×60×65 см), наполненный водопроводной водой на глубину 45 см. Температуру воды поддерживали на уровне 30–32 °С. Резервуар был разделен пластиковыми перегородками на шесть ячеек. Чтобы избежать взаимодействия животных, каждую крысу помещали в отдельную ячейку.

Массу тела крыс измеряли каждую неделю в течение всего периода эксперимента с помощью лабораторных электронных весов ЕК 2000i (AND, Япония, точность 0,1 г), также измеряли длину тела крыс без хвоста и вычисляли индекс массы тела как отношение массы тела к квадрату длины тела.

Биоимпедансное исследование проводили при помощи анализатора физических свойств материалов и веществ 126094W (Solartron Analytical, Великобритания), электрический импеданс миокарда измеряли после курса физических тренировок. Крысам перед вскрытием грудной клетки вводили золетил (25 мг/кг массы тела, внутримышечно), уретан (650 мг/кг массы тела, внутривентриально), выполняли трахеотомию и переводили животных на искусственное дыхание с использованием аппарата SAR-830/AP (CWE Inc., США). Частота дыхания составляла 60 дыханий в мин, дыхательный объем подбирали в зависимости от массы тела. Использовали полосу с медными электродами (диаметр 0,1 мм, длина контакта ~1 мм, расстояние между измеряющими и токовыми электродами ~1,1 и 3,5 мм соответственно). Электроды располагали на эпикарде медиальной части вентральной поверхности свободной стенки ЛЖ сердца. Выполняли межгрупповое сравнение значений компонентов (активного (R) и реактивного сопротивления, фазового угла, амплитуды (Z)) биоэлектрического импеданса (БЭИ) миокарда при частотах 20, 50 и 100 кГц электрического тока, отношения Z при низкой и высокой частотах.

По окончании эксперимента извлекали сердце и селезенку, определяли их массу с помощью аналитических весов (AR0640, Ohaus Corp., USA, точность 0,0001 г). Относительную массу органов рассчитывали как отношение массы органа к массе тела. Гистологическое исследование миокарда проведено на парафиновых срезах толщиной 7 мкм, полученных с помощью санного

микротомом МС-2 на уровне папиллярных мышц (поперечное сечение). Для определения морфологических изменений в структуре миокарда препараты окрашивали гематоксилином и эозином (у 19 крыс). Для выявления межклеточных структур соединительной ткани на срезах сердец (у 16 крыс), полученных после 12-недельной программы, проводили окрашивание по Ван Гизону, при котором коллагеновые и эластиновые волокна приобретают красный/ярко-розовый цвет, что позволяет количественно оценить их объем на препарате. С использованием световой микроскопии по срезам измеряли толщину свободной стенки и межжелудочковой перегородки, внутренний диаметр ЛЖ. Вычисляли относительную толщину ЛЖ как отношение суммы толщин к внутреннему диаметру ЛЖ.

Срезы фотографировали цифровой камерой-окуляром (DCM510, Бельгия) при увеличении ×200, ×600. С использованием системы анализа изображений ImageJ 1.54g (США) измеряли диаметр четырех кардиомиоцитов с видимыми ядрами на трех изображениях свободной стенки ЛЖ сердца, сделанных в диапазоне от эпикарда до эндокарда (в области измерения биоимпеданса). Для определения доли мышечных пучков и соединительной ткани в стенке ЛЖ сердца подсчитывали количество узлов сетки (10×10 в области 0,31 мм²), окрашенных в желтый или красный цвет, на микрофотографиях свободной стенки ЛЖ сердца, сделанных в диапазоне от эпикарда до эндокарда (в области измерения биоимпеданса). Вычисляли отношение разности максимального и минимального диаметра кардиомиоцитов к его медиане для каждого животного в качестве относительного показателя вариации.

Статистическая обработка проведена с помощью пакета программ статистического анализа Statistica 10.0. Количественные признаки описаны при помощи медианы (Me) и межквартильного размаха [Q1; Q3]. Для анализа временных изменений массы тела крыс применяли дисперсионный анализ Фридмана, критерий Вилкоксона. Межгрупповые различия массы тела, сердца, характеристик морфологии миокарда определяли критерием Манна – Уитни. Для выявления отличия БЭИ сердца у крыс опытной группы от значений у животных контрольной и интактной групп на множестве частот тока использовали критерий Манна – Уитни с корректировкой уровня статистической значимости при множественных сравнениях по формуле $p = 1 - 0,95^{1/n}$. Корреляционный анализ (для всей выборки крыс) проводили по критерию Спирмена.

Таблица 1. Изменение массы тела крыс после 12-недельного курса плавания

Table 1. Change in body weight of rats after 12 weeks of swimming

Показатель	Опытная группа		<i>p</i>	Контрольная группа		<i>p</i>	Интактная группа		<i>p</i>
	Исходно	Через 12 недель		Исходно	Через 12 недель		Исходно	Через 12 недель	
Масса тела, г	142 [128; 155]	321 [291; 328]	0,008	134 [124; 156]	350 [324; 363]	0,012	126 [112; 166]	338 [333; 350]	0,068
Индекс массы тела, г/см ²	0,4 [0,4; 0,5]	0,6 [0,6; 0,7]	0,008	0,5 [0,4; 0,5]	0,6 [0,6; 0,7]	0,012	0,4 [0,4; 0,5]	0,6 [0,6; 0,7]	0,068

Результаты

За 12 недель программы исследования масса тела крыс увеличилась относительно исходной: у животных опытной, контрольной и интактной групп – соответственно на 125 [106; 132], 153 [133; 186] и 179 [117; 202] % (табл. 1); масса тела крыс опытной группы была не значимо меньше после курса плавания в сравнении с животными интактной группы ($U = 4, Z = -2,1, p = 0,037$). Также увеличился индекс массы тела – соответственно на 30 [22; 45], 40 [38; 48] и 50 [33; 55] %, значимо не различаясь между группами (см. табл. 1). После 12-недельной программы исследования группы не различались по абсолютной массе сердца ($p > 0,05$), в то время как относительная масса сердца у крыс опытной группы после курса плавания была больше, чем у животных контрольной ($U = 14, Z = 2,3, p = 0,023$) и интактной ($U = 0, Z = 2,8, p = 0,006$) групп (табл. 2). Как абсолютная, так и относительная масса селезенки в группах после 12-недельной программы исследования была одинаковой ($p > 0,05$), не выявлено различий и по параметрам ЛЖ (см. табл. 2).

При микроскопическом анализе после 12-недельной программы тренировок у животных всех групп наблюдали нормальную поперечную исчерченность кардиомиоцитов, упорядоченное расположение волокон (рис. 1). Диаметр кардиомиоцитов ЛЖ сердца (в целом) был значимо меньше у крыс интактной группы, чем у животных опытной ($U = 26, Z = 2,6, p = 0,01$) и контрольной ($U = 15, Z = 3,1, p = 0,002$) групп (см. табл. 2), наибольшее различие отмечено в субэпикарде ЛЖ в сравнении с контрольными крысами (рис. 2). Относительный показатель вариации диаметра кардиомиоцитов у крыс опытной и контрольной групп в трех слоях ЛЖ сердца не отличался от значений крыс интактной группы. У крыс контрольной группы площадь, занимаемая соединительной тканью на изображениях стенки ЛЖ, была больше, чем у животных опытной группы ($U = 3,5, Z = -2,5, p = 0,014$), значимо не отличалась от значения у крыс интактной группы (см. табл. 2). Соотношение доли мышечной и соединительной ткани на микроскопических срезах (см. рис. 1) значимо не различалось (см. табл. 2).

Таблица 2. Масса органов и параметры ЛЖ сердца крыс после 12-недельного курса плавания

Table 1. Rat organ mass and heart left ventricle parameters after 12 weeks of swimming

Показатель	Опытная группа	Контрольная группа	Интактная группа
Абсолютная масса сердца, г	1,11 [1,03; 1,12]	1,07 [1,02; 1,19]	1,01 [0,99; 1,02]
Относительная масса сердца, г/кг массы тела	3,47 [3,38; 3,56]	3,09 [2,97; 3,38]	2,95 [2,91; 2,97]
Абсолютная масса селезенки, г	1,1 [1,1; 1,2]	1,2 [1,1; 1,5]	1,1 [1,1; 1,1]
Относительная масса селезенки, г/кг массы тела	3,4 [3,3; 3,8]	3,6 [3,3; 4,2]	3,3 [3,1; 3,4]
Толщина свободной стенки ЛЖ, мм	2,0 [1,8; 2,2]	2,1 [1,9; 2,4]	2,1 [1,9; 2,1]
Внутренний диаметр ЛЖ, мм	5,8 [5,6; 6,4]	5,8 [4,7; 5,9]	5,0 [4,7; 5,8]
Относительная толщина стенки ЛЖ, мм	0,6 [0,6; 0,7]	0,7 [0,7; 0,8]	0,7 [0,6; 0,8]
Диаметр кардиомиоцитов ЛЖ, пикселей	118 [111; 128]	122 [114; 131]	105 [103; 111]
Показатель вариации диаметра кардиомиоцитов ЛЖ	0,31 [0,24; 0,42]	0,33 [0,21; 0,46]	0,30 [0,23; 0,43]
Площадь соединительной ткани ЛЖ, %	3 [3; 4]	7 [5; 9]	5 [3; 6]
Соотношение доли мышечной и соединительной ткани	21 [18; 29]	12 [9; 18]	18 [15; 29]

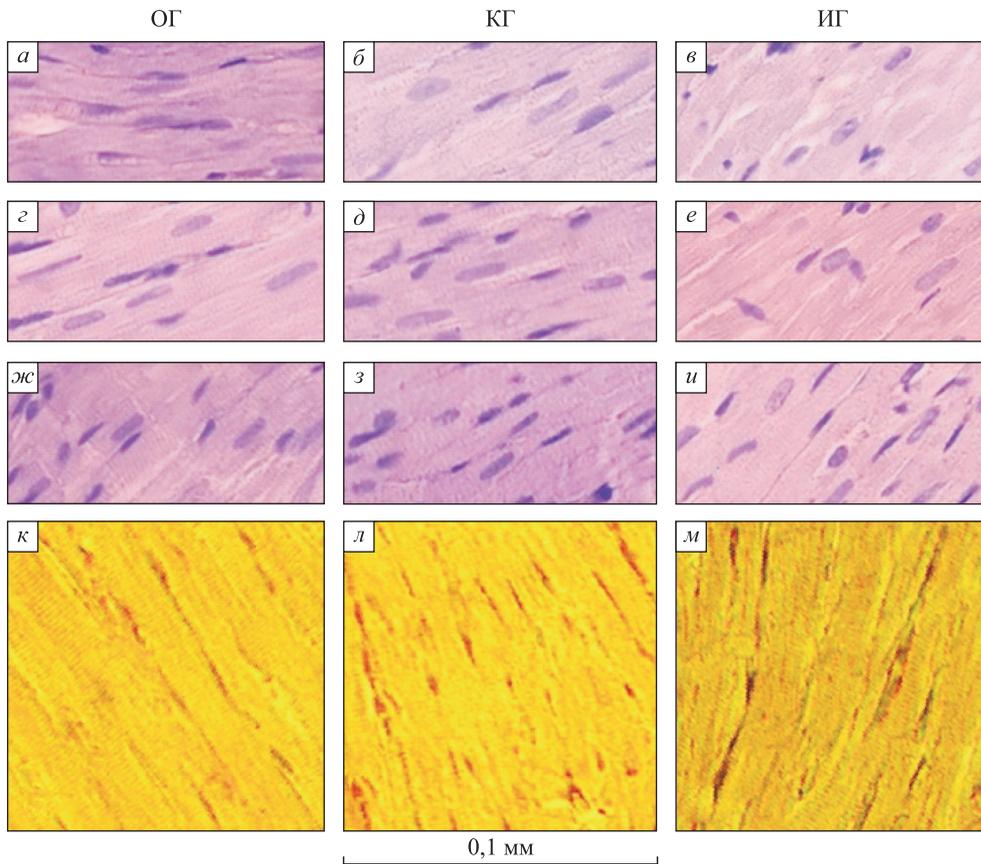


Рис. 1. Гистологическая картина ЛЖ сердца на уровне папиллярных мышц у крыс опытной (ОГ), контрольной (КГ) и интактной (ИГ) групп после 12-недельной программы тренировок: 600×, окраска гематоксилином и эозином – в субэндокарде (а, б, в), в центральной части (з, д, е), в субэпикарде (ж, з, и); 200×, окраска по Ван Гизону (к, л, м)

Fig. 1. Microscopic view of the left ventricle of the heart at the level of papillary muscles in rats of the experimental (a), control (б) and intact (c) groups after a 12-week training program: 600×, stained with hematoxylin and eosin staining – in the subendocardium (a, б, в), central part (з, д, е), in the subepicardium (ж, з, и); 200×, Van Gieson staining (к, л, м)

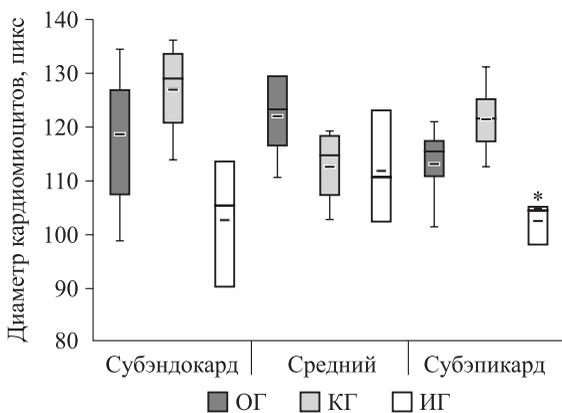
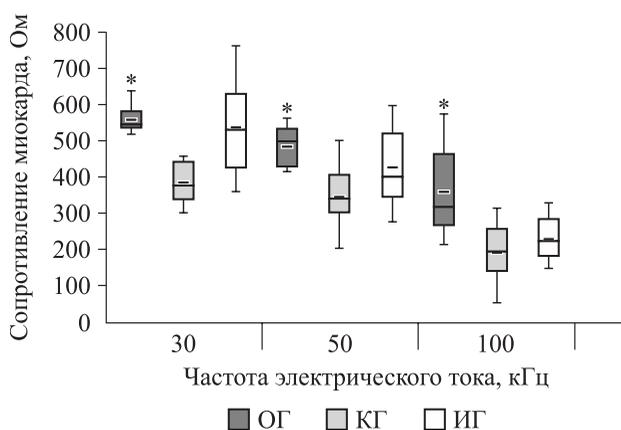


Рис. 2. Диаметр кардиомиоцитов ЛЖ сердца крыс у опытной (ОГ), контрольной (КГ) и интактной (ИГ) групп после 12-недельной программы исследования. На графике отображены распределение данных от первого до третьего квартиля, медиана, среднее значение, диапазон без выбросов; * – отличие от значения крыс контрольной группы статистически значимо ($p = 0,037$)

Fig. 2. Diameter of cardiomyocytes of the heart left ventricle in rats of the experimental (ОГ), control (КГ) and intact (ИГ) groups after a 12-week study program. The graph shows the distribution of data from the first to the third quartile, median, mean value, non-outlier region; * – significant difference compared to control group ($p = 0.037$)

После 12 недель плавания у крыс опытной группы отмечены значимо большие значения активного сопротивления БЭИ миокарда ЛЖ в сравнении с животными контрольной группы (рис. 3).

Абсолютное значение реактивного сопротивления БЭИ миокарда ЛЖ после курса плавания было значимо выше у животных опытной группы по сравнению с крысами контрольной группы при 50 кГц (-302 [-333 ; -257] Ом и (-210 [-244 ; -181] Ом, $U = 5$, $Z = -2,6$, $p = 0,009$) электрического тока. Амплитуда БЭИ Z миокарда ЛЖ была значимо выше у тренированных крыс (при 30 кГц: (609 [570 ; 619] Ом; при 50 кГц: (556 [529 ; 612] Ом; при 100 кГц: (474 [404 ; 582] Ом) в сравнении с животными из контрольной (при 30 кГц: (419 [380 ; 480] Ом, $U = 0$, $Z = 3,1$, $p = 0,002$; при 50 кГц: (389 [361 ; 464] Ом, $U = 5$, $Z = 2,6$, $p = 0,009$; при 100 кГц: (281 [257 ; 354] Ом, $U = 6$, $Z = 2,7$, $p = 0,007$) и интактной группы (при 100 кГц: (326 [268 ; 403] Ом, $U = 8$, $Z = 2,5$, $p = 0,014$). После 12-недельного плавания у крыс опытной группы в сравнении с животными интактной группы выявлено меньшее отношение амплитуд Z_{30}/Z_{100} ($1,41$ [$1,23$; $1,56$] и $1,73$ [$1,65$; $1,88$], $U = 4$, $Z = -2,9$, $p = 0,004$) БЭИ миокарда ЛЖ при двух частотах. Значимые корреляционные связи показателей Z_{30}/Z_{100} БЭИ миокарда после курса плавания установлены с относительной массой сердца ($r_s = -0,7$, $p < 0,001$). Фазовый угол БЭИ миокарда ЛЖ сердца крыс трех групп был одинаковым. Значимые корреляционные связи фазового угла БЭИ миокарда у животных после курса плавания установлены с относительным показателем вариации диаметра кардиомиоцитов в субэпикардиальной и субэндокардиальной области ЛЖ сердца (при частоте 30 кГц электрического тока, $r_s = -0,6$, $p = 0,01$).



Обсуждение

При использовании протокола 12-недельного плавания, способствующего развитию у крыс обратимой физиологической гипертрофии ЛЖ сердца [9], на этапе окончания физических нагрузок нами отмечена значимо большая относительная масса сердца у тренированных крыс в сравнении с контрольными (на 12 %) и интактными (на 18 %) животными. Значимых изменений толщины стенки и внутреннего диаметра ЛЖ сердца у тренированных крыс не выявлено. Для крыс увеличение относительной массы сердца на 12 % и более характеризуется как эффективный физиологический рост сердца, вызванный плаванием [1]. При гистологическом анализе обнаружено увеличение диаметра кардиомиоцитов и у тренированных крыс, и у контрольных животных в сравнении с крысами интактной группы. В отличие от данных работы [9], у крыс опытной и контрольной групп показатель не различался.

При биоимпедансном исследовании после курса физических тренировок у животных опытной группы нами выявлены значимо большие значения активного сопротивления (30–100 кГц) и абсолютного значения реактивного сопротивления (при 50 кГц) БЭИ миокарда ЛЖ в сравнении с крысами контрольной группы. Ранее у здоровых животных при увеличении размера клеток мышечной ткани, приводящего к уменьшению объема внеклеточного пространства, отмечено увеличение электрического сопротивления при нулевой частоте [10]. Абсолютное значение реактивного сопротивления БЭИ скелетной мышцы с ростом размера миофибрилл (в зависимости от возраста животных) возрастает при частотах электрического тока 10–100 кГц [11]. Больше значение реактивного сопротивления БЭИ при 50

Рис. 3. Активное сопротивление БЭИ миокарда у крыс опытной (ОГ), контрольной (КГ) и интактной (ИГ) групп после 12-недельной программы исследования. На графике отображены распределение данных от первого до третьего квартиля, медиана, среднее значение, диапазон без выбросов; * – отличие от значения крыс контрольной группы статистически значимо ($p_{30} = 0,002$, $p_{50} = 0,009$, $p_{100} = 0,001$)

Fig. 3. Active resistance of the bioelectrical impedance of the myocardium in rats of the experimental (OG), control (KG) and intact (IG) groups after a 12-week study program. The graph shows the distribution of data from the first to the third quartile, median, and mean value value, non-outlier region; * – significant difference compared to control group ($p_{30} = 0.002$, $p_{50} = 0.009$, $p_{100} = 0.001$)

кГц у тренированных крыс может указывать на большее увеличение мышечной массы ЛЖ сердца в сравнении с контрольными, а увеличение активного сопротивления БЭИ стенки ЛЖ сердца при низкой частоте тока может быть связано с различием в объеме межклеточного пространства. Нами выявлено значимо меньшее отношение амплитуд Z_{30}/Z_{100} у крыс опытной группы после курса плавания в сравнении с животными интактной группы. Амплитуда БЭИ ЛЖ сердца тренированных крыс при 100 кГц была значимо больше, чем у интактных животных; выявлена зависимость отношения амплитуд Z_{30}/Z_{100} от относительной массы сердца. Меньшее отношение амплитуд Z_{30}/Z_{100} наряду со значимым различием в диаметре кардиомиоцитов может быть связано с изменением соотношения объемов внутри- и внеклеточного пространства.

При гистологическом исследовании нами выявлены различия в количестве соединительной ткани в миокарде у тренированных и погружаемых на пять минут в воду крыс. Значимые различия в БЭИ миокарда у животных опытной и контрольной групп можно объяснить изменениями в объеме соединительной ткани. При увеличении количества соединительной ткани сопротивление (при 41 кГц) и абсолютное значение фазового угла биоимпеданса миокарда снижаются [12]. На начальной стадии фиброза изменения электроимпедансной спектроскопии могут быть связаны с внутриклеточными процессами, которые предваряют или даже стимулируют фиброз [13]. На распространение электрического тока в миокарде влияет не только объем фиброзной ткани, но и тип фиброзных изменений; гипертрофия кардиомиоцитов при отсутствии соединительной ткани может вызывать нарушения проводимости [14]. Y.L. Protsenko et al. отмечено большее значение коэффициента вариации размера диаметра кардиомиоцитов при патологическом типе (вызванном монокроталином) гипертрофии миокарда при сравнении с физиологическим типом (плавание) [15].

У тренированных крыс относительный показатель вариации диаметра кардиомиоцитов не отличался от значения у контрольных и интактных животных. При исследованиях на животных отмечено подавление фиброза в миокарде с помощью физических упражнений наряду с уменьшением окислительного стресса и воспаления при патологическом воздействии [16]. Ранее при исследовании тренированных крыс после программы 8-недельного плавания нами не обнаружено значимых изменений в относительной массе сердца, в биоимпедансе миокарда ЛЖ сердца в сравнении с контрольными животными [17].

Заключение

Таким образом, после 12 недель исследования нами отмечено увеличение диаметра кардиомиоцитов как у крыс, прошедших полноценный курс плавания, так и у животных, плававших по пять минут в день, в сравнении с животными, которые находились в условиях обычного двигательного режима. Биоимпеданс миокарда, измеряемый с поверхности ЛЖ сердца крыс, зависит от увеличения диаметра кардиомиоцитов, способствующего изменению объема внеклеточного пространства. У животных, подвергавшихся физической нагрузке разной длительности, выявлены значимые различия в активном и реактивном сопротивлении БЭИ миокарда ЛЖ сердца, указывающие на изменения объема мышечной и соединительной ткани.

Список литературы / References

1. Bei Y., Wang L., Ding R., Che L., Fan Z., Gao W., Liang Q., Lin S., Liu S., Lu X., ... Xiao J. Animal exercise studies in cardiovascular research: Current knowledge and optimal design-A position paper of the Committee on Cardiac Rehabilitation, Chinese Medical Doctors' Association. *J. Sport Health. Sci.* 2021;10(6):660–674. doi: 10.1016/j.jshs.2021.08.002
2. Soares D.D.S., Pinto G.H., Lopes A., Caetano D.S.L., Nascimento T.G., Andrades M.E., Clausell N., Rohde L.E.P., Leitão S.A.T., Biolo A. Cardiac hypertrophy in mice submitted to a swimming protocol: influence of training volume and intensity on myocardial renin-angiotensin system. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* 2019;316(6):R776–R782. doi: 10.1152/ajpregu.00205.2018
3. Yan Z., Zeng N., Li J., Liao T., Ni G. Cardiac effects of treadmill running at different intensities in a rat model. *Front. Physiol.* 2021;12:774681. doi: 10.3389/fphys.2021.774681
4. Martins P.C., Moraes M.S., Silva D.A.S. Cell integrity indicators assessed by bioelectrical impedance: A systematic review of studies involving athletes. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 2020;24(1):154–164. doi: 10.1016/j.jbmt.2019.05.017
5. Cebrián-Ponce Á., Iruñia A., Carrasco-Marginet M., Saco-Ledo G., Girabent-Farrés M., Castizo-Olier J. Electrical impedance myography in health and physical exercise: a systematic review and future perspectives. *Front. Physiol.* 2021;12:740877. doi: 10.3389/fphys.2021.740877
6. Khoury D.S., Naware M., Siou J., Blomqvist A., Mathuria N.S., Wang J., Shih H.T., Nagueh S.F., Panescu D. Ambulatory monitoring of congestive heart failure by multiple bioelectric impedance vectors. *J. Am. Coll. Cardiol.* 2009;53(12):1075–1081. doi: 10.1016/j.jacc.2008.12.018

7. Торнуев Ю.В., Балахнин С.М., Преображенская В.К., Манвелидзе Р.А., Ивлева Е.К. Биоимпедансометрия миокарда при очаговых и диффузных повреждениях различного генеза. *Соврем. пробл. науки и образ.* 2016;(4):78. doi: 10.17513/spno.25001
- Tornuev Yu.V., Balakhnin S.M., Preobrazhenskaya V.K., Manvelidze R.A., Ivleva E.K. Bioimpedance measuring myocardium in focal and diffuse injuries of various genesis. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern Problems of Science and Education.* 2016;(4):78. [In Russian]. doi: 10.17513/spno.25001
8. Jacobson J.T., Hutchinson M.D., Cooper J.M., Woo Y.J., Shandler R.S., Callans D.J. Tissue-specific variability in human epicardial impedance. *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* 2011;22(4):436–439. doi: 10.1111/j.1540-8167.2010.01929.x
9. Radovits T., Oláh A., Lux Á., Németh B.T., Hidi L., Birtalan E., Kellermayer D., Mátyás C., Szabó G., Merkely B. Rat model of exercise-induced cardiac hypertrophy: hemodynamic characterization using left ventricular pressure-volume analysis. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2013;305(1):H124–134. doi: 10.1152/ajpheart.00108.2013
10. Sanchez B., Li J., Yim S., Pacheck A., Widrick J.J., Rutkove S.B. Evaluation of electrical impedance as a biomarker of myostatin inhibition in wild type and muscular dystrophy mice. *PLoS One.* 2015;10(10):e0140521. doi: 10.1371/journal.pone.0140521
11. Kapur K., Taylor R.S., Qi K., Nagy J.A., Li J., Sanchez B., Rutkove S.B. Predicting myofiber size with electrical impedance myography: A study in immature mice. *Muscle Nerve.* 2018;10.1002/mus.26111. doi: 10.1002/mus.26111
12. Amorós-Figueras G., Jorge E., García-Sánchez T., Bragós R., Rosell-Ferrer J., Cinca J. Recognition of fibrotic infarct density by the pattern of local systolic-diastolic myocardial electrical impedance. *Front. Physiol.* 2016;7:389. doi: 10.3389/fphys.2016.00389
13. Skourou C., Hoopes P.J., Paulsen K.D. Tissue permittivity. A monitor for progressive tissue fibrosis as observed in bystander tissues following experimental high dose rate irradiation. *Cancer Biol. Ther.* 2009. 8(23):2223–2229. doi: 10.4161/cbt.8.23.9983
14. Verheule S., Schotten U. Electrophysiological consequences of cardiac fibrosis. *Cells.* 2021;10(11):3220. doi: 10.3390/cells10113220
15. Protsenko Y.L., Balakin A.A., Kuznetsov D.A., Kursanov A.G., Lisin R.V., Mukhlynina E.A., Lookin O.N. Contractility of right ventricular myocardium in male and female rats during physiological and pathological hypertrophy. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2017;162(3):303–305. doi: 10.1007/s10517-017-3600-x
16. Hastings M.H., Castro C., Freeman R., Abdul Kadir A., Lerchenmüller C., Li H., Rhee J., Roh J.D., Roh K., Singh A.P., ... Rosenzweig A. Intrinsic and extrinsic contributors to the cardiac benefits of exercise. *JACC Basic Transl. Sci.* 2023;9(4):535–552. doi: 10.1016/j.jacbs.2023.07.011
17. Kolomeyets N.L., Ivonin A.G., Peshkin E.A., Roshchevskaya I.M. Bioelectrical impedance of the left ventricular myocardium, lung in rats after forced swimming training and subsequent detraining. *J. Evol. Biochem. Phys.* 2023;59(1):69–81. doi: 10.1134/S0022093023010064

Сведения об авторах:

Коломеец Наталия Леонидовна, к.ф.-м.н., ORCID: 0000-0002-7555-9306, e-mail: kolomeec@frc.komisc.ru
Ивонин Алексей Геннадьевич, к.б.н., ORCID: 0000-0001-6140-1252
Гуляева Анна Сергеевна, к.б.н., ORCID: 0000-0003-3517-4169
Рощевская Ирина Михайловна, д.б.н., чл.-корр. РАН, ORCID: 0000-0002-6108-1444, e-mail: compcard@mail.ru

Information about the authors:

Natalia L. Kolomeyets, candidate of physico-mathematical sciences, ORCID: 0000-0002-7555-9306, e-mail: kolomeec@frc.komisc.ru
Alexey G. Ivonin, candidate of biological sciences, ORCID: 0000-0001-6140-1252
Anna S. Gulyaeva, candidate of biological sciences, ORCID: 0000-0003-3517-4169
Irina M. Roshchevskaya, doctor of biological sciences, corresponding member of RAS, ORCID: 0000-0002-6108-1444, e-mail: compcard@mail.ru

Поступила в редакцию 02.01.2025
После доработки 14.03.2025
После повторной доработки 20.04.2025
Принята к публикации 20.04.2025

Received 02.01.2025
Revision received 14.03.2025
Second revision received 20.04.2025
Accepted 20.04.2025