

Цитофизиологическая активность миокарда желудочков сердца лабораторной крысы при дозированной физической нагрузке

А.А. Виноградов¹ ✉, И.В. Андреева², П.И. Смотаев¹, Т.А. Бадинова³

¹ Рязанский государственный медицинский университет, Рязань, Россия

² Московский областной научно-исследовательский клинический институт имени М.Ф. Владимирского, Москва, Россия

³ Луганский государственный медицинский университет, Луганск, Россия

Аннотация. В эксперименте на крысах линии Wistar в течение 60 суток моделировали дозированную физическую нагрузку с использованием бегового тренажера. Интенсивность тренировок постепенно увеличивалась: от начальной скорости 2–3 км/ч до 5–10 км/ч. Продолжительность каждой тренировки варьировалась от 30 до 40 мин в зависимости от выносливости крысы. На 20-е, 40-е и 60-е сутки эксперимента у пяти крыс контрольной и опытной групп (в каждой временной точке) определяли массу миокарда правого и левого желудочков сердца и способность клеток миокарда поглощать нейтральный красный краситель. Для этого крысам под наркозом в брюшную полость вводили 0,5%-й раствор нейтрального красного (0,5 мл на 100 г массы тела). Через 20 мин крыс подвергали эвтаназии передозировкой зоветила. Краситель извлекали из миокарда желудочков, помещая их в подкисленный 70%-й спирт. Концентрацию красителя в супернатанте измеряли с помощью фотоколориметра (в мкг). После высушивания ткани желудочков сердца определяли концентрацию красителя в расчете на единицу массы ткани (мкг/мг). Было установлено, что масса миокарда на 20-е, 40-е и 60-е сутки эксперимента увеличивалась больше в левом желудочке. Концентрация красителя в миокарде желудочков сердца у крыс, подвергавшихся физическим нагрузкам (опытная группа), была выше, чем у контрольных крыс. В правом желудочке разница составила $(0,017 \pm 0,001)$, $(0,041 \pm 0,002)$ и $(0,048 \pm 0,001)$ мкг/мг на 20-е, 40-е и 60-е сутки соответственно. В левом желудочке разница была меньше и составила $(0,023 \pm 0,002)$, $(0,025 \pm 0,002)$ и $(0,029 \pm 0,001)$ мкг/мг на те же временные точки. Выводы. Регулярные дозированные физические нагрузки в виде принудительного бега приводят к разнонаправленным изменениям цитофизиологической активности миокарда. При этом в правом желудочке сердца преобладает эффект сорбции. Гипертрофия миокарда левого желудочка негативно сказывается на цитофизиологической активности миокарда, что проявляется в снижении сорбционной способности миокарда в отношении витального красителя (нейтрального красного). Рекомендуемая продолжительность курса дозированных физических нагрузок у человека не должна превышать 20 суток.

Ключевые слова: физическая нагрузка, сорбционная способность миокарда желудочков сердца, крыса линии Wistar

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2025-22-3-88-95>

Cytophysiological activity of the ventricular myocardium of a laboratory rat with metered physical activity

A.A. Vinogradov¹ ✉, I.V. Andreeva², P.I. Samotaev¹, T.A. Badinova³

¹ Ryazan State Medical University, Ryazan, Russia

² Moscow Regional Clinical Research Institute named after M.F. Vladimirsky, Moscow, Russia

³ Lugansk State Medical University, Lugansk, Russia

Abstract. In the experiment, Wistar rats were subjected to a controlled physical load using a treadmill for 60 days. The intensity of the training gradually increased from an initial speed of 2–3 km/h to 5–10 km/h. The duration of each workout varied from 30 to 40 minutes, depending on the endurance of the rat. On the 20th, 40th and 60th days of the experiment, the mass of the myocardium of the right and left ventricles of the heart and the ability of myocardial cells to absorb neutral red dye were determined in five rats from the control and experimental groups (at each time point). To do this, a 0.5 % solution of neutral red (0.5 ml per 100 g of body weight) was injected into the abdominal cavity of rats under anesthesia. After 20 minutes, the rats were euthanized with an overdose of zoletil. The dye was extracted from the ventricular myocardium by placing them in acidified 70 % alcohol. The dye concentration in the supernatant was measured using a photocolormeter (in micrograms). After drying the ventricular tissue of the heart, the dye concentration per unit tissue mass (mcg/mg) was determined. It was found that the mass of the myocardium on the 20th, 40th and 60th days of the experiment increased more in the left ventricle. The concentration of dye in the myocardium of the ventricles of the heart in rats subjected to physical exertion (experimental group) was higher than in control rats. In the right ventricle, the difference was (0.017 ± 0.001) , (0.041 ± 0.002) and (0.048 ± 0.001) micrograms/mg on days 20, 40, and 60, respectively. In the left ventricle, the difference was smaller and amounted to (0.023 ± 0.002) , (0.025 ± 0.002) and (0.029 ± 0.001) micrograms/mg at the same time points. Conclusions. Regularly dosed physical exertion in the form of forced running leads to multidirectional changes in the cytophysiological

activity of the myocardium. At the same time, the effect of sorption prevails in the right ventricle of the heart. Myocardial hypertrophy of the left ventricle has a negative effect on the cytophysiological activity of the myocardium, which manifests itself in a decrease in the sorption capacity of the myocardium in relation to a vital dye (neutral red). The recommended duration of a course of dosed physical exertion in humans should not exceed 20 days.

Keywords: physical activity, cardiac ventricular myocardial sorption capacity, Wistar rat

Современная жизнь сопровождается сложными социальными и психологическими проблемами, что оказывает значительное стрессовое воздействие на человека. Этот стресс часто становится причиной развития сердечно-сосудистых заболеваний и психосоматических расстройств. В связи с этим организм вынужден активизировать адаптационные механизмы, чтобы противостоять негативному влиянию окружающей среды [1, 2, 3]. Физическая активность играет ключевую роль в лечении сердечно-сосудистых заболеваний и поддержании общего физического и психического здоровья [4].

Адаптация сердечно-сосудистой системы к физическим нагрузкам связана с периодическим метаболическим стрессом, интенсивность которого зависит от характеристик нагрузки. Правильно подобранные физические нагрузки повышают устойчивость сердца к повреждениям, поддерживая при этом общее метаболическое равновесие. Однако чрезмерные нагрузки могут привести к опасным нарушениям сердечного ритма, гипертрофии миокарда и сердечной недостаточности, что может приводить к летальному исходу [3, 5]. Поэтому в кардиологии реабилитация пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями включает индивидуально разработанные программы физических тренировок. Важным показателем риска развития сердечно-сосудистой патологии является изменение электрофизиологической активности миокарда желудочков после физической нагрузки [6]. Пациентам со стабильной формой ишемической болезни сердца (ИБС), а также после операций по поводу ИБС рекомендованы физические тренировки с постепенным увеличением нагрузки и постоянной оценкой жизнеспособности и функциональных резервов миокарда [7, 8, 9].

Исследования, выполненные на лабораторных животных (крысы, собаки), предусматривали применение моделей физической нагрузки различной степени интенсивности. При этом было зафиксировано, что высокая физическая активность вызывает негативные изменения в организме животных. Тем не менее, цитофизиологическая активность миокарда желудочков сердца не являлась предметом этих исследований [10, 11, 12].

В исследованиях влияния физической нагрузки на сердце основное внимание уделяется оценке жизнеспособности и функциональных резервов миокарда в условиях метаболического стресса. Однако реакция кардиомиоцитов на изменения внутренней среды изучена недостаточно. В частности, практически отсутствует информация о влиянии физической нагрузки на цитофизиологическую активность миокарда желудочков сердца в условиях дозированной физической нагрузки.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Установление влияния дозированной физической нагрузки в виде принудительного бега на изменение цитофизиологической активности миокарда желудочков сердца крыс линии Wistar по данным дифференцированного воздействия на сорбционную способность миокарда правого и левого желудочков сердца.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в зимний период на 35 крысах-самцах линии Wistar зрелого возраста (15 месяцев) с массой 210–218 г, взятых из питомника лабораторных животных филиала «Столовая» ФГБУН НЦБМТ ФМБА России. При содержании животных руководствовались «Принципами надлежащей лабораторной практики» (национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ № 33044-2014, введен с 01.08.2015), приказом Минздрава России от 01.04.2016 № 199н «Об утверждении правил надлежащей лабораторной практики», «Санитарно-эпидемиологическими требованиями к устройству, оборудованию и содержанию экспериментально-биологических клиник (вивариев)» (СП 2.2.1.3218-14).

Исследование одобрено на заседании биоэтической комиссии ФГБОУ ВО РязГМУ Минздрава России (Протокол № 102, 2025). В начале исследования проводилась рандомизация животных методом таблицы случайных чисел. Отбор животных в опытную группу (ОГ) осуществляли путем бегового тренинга с применением беговой дорожки (рис. 1) со скоростью 2 км/ч до 10 мин. Крысы, не выполнявшие полноценный бег, были введены в контрольную группу (КГ). Крыс КГ (20 особей) и ОГ (15 особей) взвешивали на электронных весах Kitchen Scale SF-400 (США).

В начале наблюдения 5 крысам КГ под наркозом (Золетил Virbac 0,3 мг в/м) в брюшную полость вводили 0,5%-й водный раствор нейтрального красного (НК) (класс по Colour Index 2-е изд., BR № 50040), нагретый до температуры тела, из расчета 0,5 мл на 100 г массы крысы. Через 20 мин передозировкой Золетил Virbac выполняли эвтаназию и извлекали сердце. Осуществляли раздельное взвешивание желудочков сердца на электронных весах DIGITAL SCALE (Китай) с дискретностью 0,01 г. Определяли абсолютную массу миокарда (без межжелудочковой оболочки) правого (ПЖС) и левого (ЛЖС) желудочков сердца. Выполняли экскрецию НК в 70%-м подкисленном спирте. Через 24 ч после инкубации в спиртовом растворе при комнатной температуре (+20–22 °C) препараты извлекали, высушивали в термостате BINDER GmbH (Германия) при температуре +55 °C до постоянного веса (сухого остатка) и повторно взвешивали.

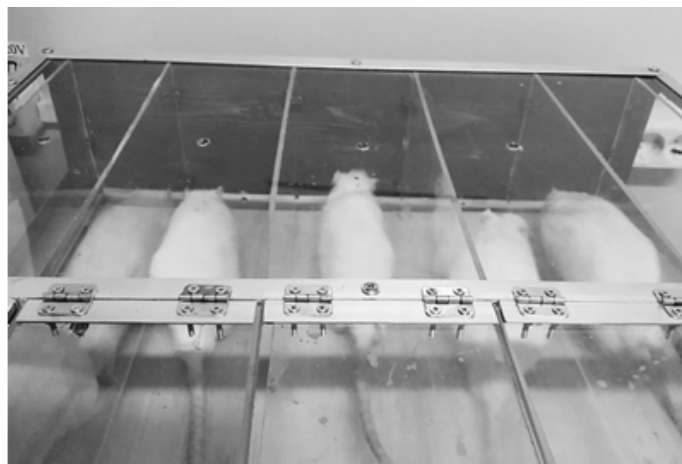
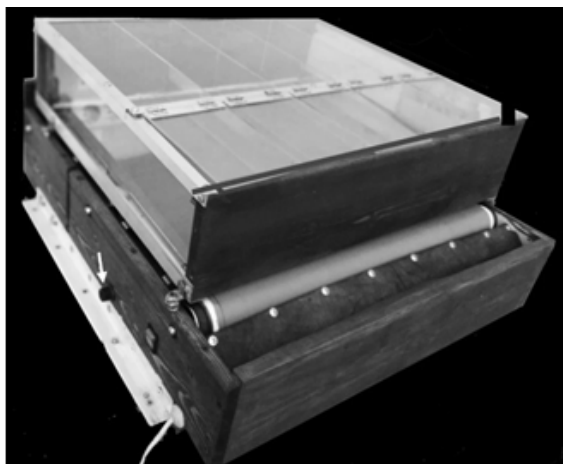


Рис. 1. Устройства для моделирования физической нагрузки в виде дозированного, принудительного бега.
Стрелкой показан регулятор скорости беговой дорожки

В течение 5 мин спиртовые растворы центрифугировали при скорости 1000 об./мин. Супернатант колориметрировали на КФК-2МП и по градуированному графику определяли концентрацию НК в мкг. Фотоколориметрические показатели делили на массу высушенного препарата и определяли количественные показатели концентрации НК в мкг/мг [13].

Крыс ОГ в течение 60 суток ежедневно подвергали ФН с начальной скоростью бега 2–3 км/ч. При отсутствии признаков утомления скорость бега постепенно повышали до 5–10 км/ч. Продолжительность эксперимента составляла от 30 до 40 мин и зависела от продуктивности бега животного.

Через 20, 40 и 60 суток по 5 крыс из КГ и ОГ выводили из эксперимента. Взвешивали и определяли количественные показатели концентрации НК в мкг/мг в миокарде ПЖС и ЛЖС по вышеизложенной методике [13].

Цифровые данные обрабатывали методами вариационной статистики с помощью программы StatSoft Statistica 13.0 (США, номер лицензии AXA003J115213FAACD-X, Statsoft.ru) и Microsoft Excel for MAC ver. 16.24 (США, ID 02984-001-000001). Устанавливали: нормальность распределения данных по критерию Шапиро – Уилка (W-критерий). Так как по W-критерию была подтверждена нормальность распределения показателей, описание проводили с помощью критериев параметрической статистики. Истинные параметры находились в пределах определенного доверительного интервала (95 %). Рассчитывали среднее арифметическое значение выборки (М) и стандартную ошибку (m); по t-критерию Стьюдента для несвязанных совокупностей определяли вероятность ошибки (р) с достоверностью $\leq 0,05$; коэффициент корреляции определяли по Пирсону (r_{xy}). Для качественной оценки силы корреляции и ассоциации руководствовались шкалой Чеддока: коэффициент корреляции 0,7–0,9

определял высокую, а 0,9–1,0 – весьма высокую корреляционную зависимость [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исходный показатель (ИП) массы крыс до начала эксперимента колебался в пределах $(211,6 \pm 1,28)$ г. Масса миокарда ЛЖС, $(0,380 \pm 0,004)$ г, была в $(2,814 \pm 0,063)$ раза больше ($r_{xy} = 0,990$; $p < 0,001$), чем миокард ПЖС, $(0,135 \pm 0,005)$ г. В миокарде ЛЖС концентрация НК была $(0,551 \pm 0,004)$ мкг/мг, что в $(1,092 \pm 0,002)$ раза больше ($r_{xy} = 0,968$; $p = 0,001$), чем в миокарде ПЖС $(0,505 \pm 0,003)$ мкг/мг (рис. 2, 3).

Через 20 суток масса крысы КГ в сравнении с ИП увеличилась в $(1,113 \pm 0,004)$ раза ($r_{xy} = 0,904$; $p < 0,001$) и колебалась в пределах $(235,6 \pm 1,92)$ г. Масса миокарда ПЖС увеличилась в сравнении с ИП в $(1,101 \pm 0,013)$ раза ($r_{xy} = 0,979$; $p = 0,047$) и составляла $(0,149 \pm 0,003)$ г. Масса миокарда ЛЖС была $(0,414 \pm 0,005)$ г, что в $(1,089 \pm 0,002)$ раза больше ИП ($r_{xy} = 0,990$; $p = 0,001$). Масса миокарда ЛЖС была в $(2,782 \pm 0,036)$ раза больше ($r_{xy} = 0,979$; $p = 0,047$), чем масса миокарда ПЖС.

На 20-е сутки концентрация НК в миокарде ПЖС крыс КГ была в $(1,084 \pm 0,002)$ раза больше ИП ($r_{xy} = 0,987$; $p = 0,001$) и составляла $(0,547 \pm 0,005)$ мкг/мг, что было в $(1,097 \pm 0,005)$ раза меньше ($r_{xy} = 0,922$; $p = 0,001$), чем в миокарде ЛЖС, $(0,600 \pm 0,004)$ мкг/мг, но больше в $(1,084 \pm 0,002)$ раза, на $(0,043 \pm 0,002)$ мкг/мг, ИП ($r_{xy} = 0,987$; $p = 0,001$). В миокарде ЛЖС концентрация НК была больше в $(1,089 \pm 0,002)$ раза, на $(0,049 \pm 0,001)$ мкг/мг, ИП ($r_{xy} = 0,964$; $p = 0,001$).

К 40-м суткам наблюдения масса крысы увеличивалась до $(259,0 \pm 1,60)$ г и была больше 20-суточного показателя в $(1,099 \pm 0,002)$ раза ($r_{xy} = 0,975$; $p = 0,001$). Масса миокарда ПЖС увеличилась в сравнении с 20-суточным показателем в $(1,079 \pm 0,005)$ раза ($r_{xy} = 0,976$; $p = 0,048$) и была в пределах $(0,161 \pm 0,004)$ г.

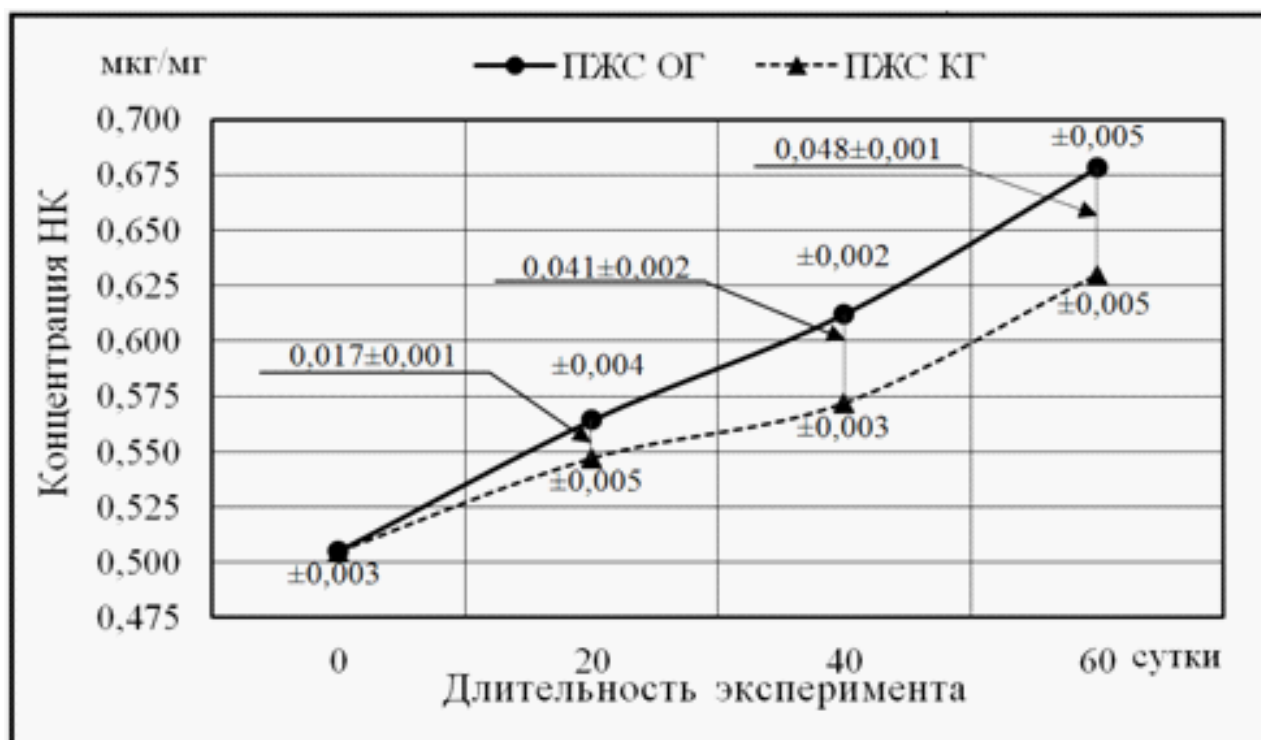


Рис. 2. Концентрация нейтрального красного в миокарде правого желудочка сердца животных контрольной и опытной групп в процессе 60-суточного наблюдения. Стрелками показано истинное изменение концентрации нейтрального красного в миокарде ПЖС, зависящее от физической нагрузки

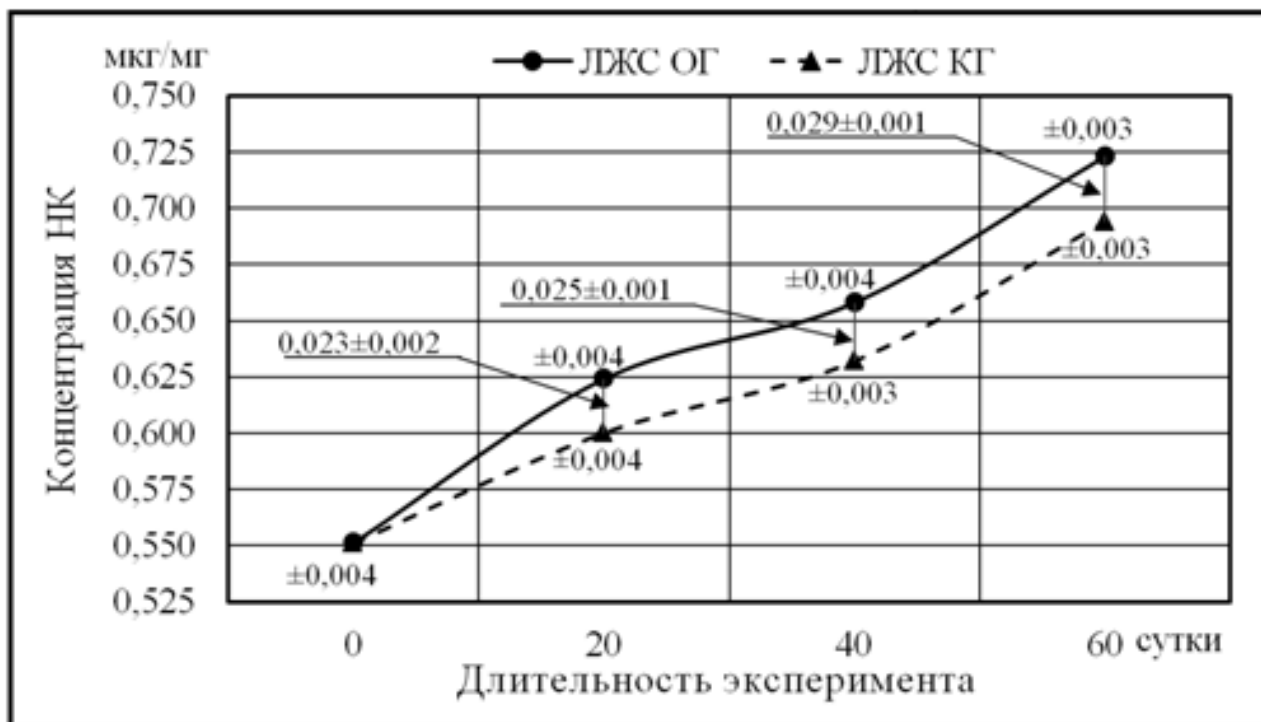


Рис. 3. Концентрация нейтрального красного в миокарде левого желудочка сердца животных контрольной и опытной групп в процессе 60-суточного наблюдения. Стрелками показано истинное изменение концентрации нейтрального красного в миокарде ПЖС, зависящее от физической нагрузки

Масса миокарда ЛЖС составляла $(0,455 \pm 0,004)$ г, что в $(1,099 \pm 0,002)$ раза больше 20-суточного показателя ($r_{xy} = 0,987$; $p = 0,001$). Масса миокарда ЛЖС была больше в $(2,834 \pm 0,039)$ раза ($r_{xy} = 0,976$; $p = 0,048$), чем масса миокарда ПЖС.

На 40-е сутки у крыс КГ концентрация НК в миокарде ПЖС была больше в $(1,045 \pm 0,003)$ раза, на $(0,024 \pm 0,002)$ мкг/мг, 20-суточного показателя ($r_{xy} = 0,996$; $p = 0,001$) и составляла $(0,572 \pm 0,003)$ мкг/мг. Концентрация НК в миокарде ПЖС была меньше в $(1,106 \pm 0,002)$ раза ($r_{xy} = 0,984$; $p < 0,001$), чем в миокарде ЛЖС. В миокарде ЛЖС концентрация НК была $(0,632 \pm 0,003)$ мкг/мг, что в $(1,053 \pm 0,003)$ раза, на $(0,032 \pm 0,001)$ мкг/мг, больше 20-суточного показателя ($r_{xy} = 0,925$; $p = 0,001$).

К 60-м суткам масса крыс КГ увеличивалась до $(288,2 \pm 3,36)$ г, в $(1,113 \pm 0,006)$ раза, при $r_{xy} = 0,971$; $p = 0,001$. Масса миокарда ПЖС в сравнении с 40-суточным показателем увеличилась в $(1,102 \pm 0,005)$ раза ($r_{xy} = 0,993$; $p = 0,041$) и была в пределах $(0,177 \pm 0,005)$ г. Масса миокарда ЛЖС увеличивалась до $(0,507 \pm 0,007)$ г, что больше в $(1,114 \pm 0,006)$ раза 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,974$; $p = 0,001$), и была больше в $(2,865 \pm 0,036)$ раза ($r_{xy} = 0,993$; $p < 0,001$), чем в ПЖС.

На 60-е сутки в миокарде ПЖС крыс КГ концентрация НК была $(0,630 \pm 0,005)$ мкг/мг, что больше в $(1,102 \pm 0,002)$ раза, на $(0,058 \pm 0,001)$ мкг/мг, 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,991$; $p = 0,001$), и меньше в $(1,101 \pm 0,003)$ раза ($r_{xy} = 0,984$; $p < 0,001$), чем в ЛЖС. В миокарде ЛЖС концентрация НК была $(0,694 \pm 0,003)$ мкг/мг, что больше в $(1,097 \pm 0,002)$ раза, на $(0,061 \pm 0,001)$ мкг/мг 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,949$; $p < 0,001$).

У крыс ОГ после 20-суточного эксперимента масса тела была больше ИП в $(1,171 \pm 0,017)$ раза ($r_{xy} = 0,853$; $p < 0,001$) и колебалась в пределах $(247,8 \pm 2,8)$ г. Масса миокарда ПЖС была больше ИП в $(1,172 \pm 0,033)$ раза ($r_{xy} = 0,967$; $p = 0,003$) и составляла $(0,158 \pm 0,001)$ г. В сравнении с 20-суточным показателем КГ установлено увеличение в $(1,064 \pm 0,018)$ раза ($r_{xy} = 0,904$; $p = 0,025$). Масса миокарда ЛЖС была $(0,429 \pm 0,003)$ г, что в $(1,128 \pm 0,005)$ раза больше ИП ($r_{xy} = 0,994$; $p = 0,001$) и больше в $(1,036 \pm 0,003)$ раза ($r_{xy} = 0,991$; $p = 0,037$), чем в КГ. Масса миокарда ЛЖС была в $(2,710 \pm 0,006)$ раза больше ($r_{xy} = 0,943$; $p < 0,001$), чем в ПЖС.

К 20-м суткам концентрация НК в миокарде ПЖС крыс ОГ составляла $(0,564 \pm 0,004)$ мкг/мг, что была больше ИП в $(1,118 \pm 0,001)$ раза, на $(0,060 \pm 0,001)$ мкг/мг, ($r_{xy} = 0,996$; $p < 0,001$), и меньше в $(1,105 \pm 0,001)$ раза ($r_{xy} = 0,998$; $p < 0,001$), чем в ЛЖС. В сравнении с 20-суточным контрольным показателем в миокарде ПЖС концентрация НК увеличивалась в $(1,031 \pm 0,002)$ раза, на $(0,017 \pm 0,001)$ мкг/мг, ($r_{xy} = 0,996$; $p = 0,033$). В миокарде ЛЖС концентрация НК колебалась в пределах $(0,624 \pm 0,004)$ мкг/мг, что было больше в $(1,131 \pm 0,001)$

раза, на $(0,072 \pm 0,001)$ мкг/мг, ИП ($r_{xy} = 0,996$; $p = 0,033$). В сравнении с контролем концентрация НК увеличивалась в $(1,039 \pm 0,003)$ раза, на $(0,023 \pm 0,002)$ мкг/мг ($r_{xy} = 0,914$; $p = 0,004$).

На 40-е сутки эксперимента масса крыс увеличилась до $(274,6 \pm 4,5)$ г – в $(1,108 \pm 0,008)$ раза ($r_{xy} = 0,921$; $p = 0,002$). Масса миокарда ПЖС составляла $(0,172 \pm 0,002)$ г и была больше 20-суточного показателя в $(1,087 \pm 0,009)$ раза ($r_{xy} = 0,959$; $p = 0,025$), а контрольного показателя – в $(1,071 \pm 0,010)$ раза ($r_{xy} = 0,993$; $p = 0,044$). Масса миокарда ЛЖС была $(0,479 \pm 0,004)$ г, что больше в $(1,117 \pm 0,002)$ раза ($r_{xy} = 0,994$; $p < 0,001$) 20-суточного показателя, и в $(1,053 \pm 0,002)$ раза ($r_{xy} = 0,983$; $p = 0,004$) 40-суточного в КГ. Масса миокарда ЛЖС была больше в $(2,785 \pm 0,013)$ раза ($r_{xy} = 0,985$; $p < 0,001$), чем в ПЖС.

На 40-е сутки эксперимента в миокарде ПЖС концентрация НК была $(0,612 \pm 0,002)$ мкг/мг – в $(1,085 \pm 0,004)$ раза, на $(0,048 \pm 0,002)$ мкг/мг больше 20-суточного показателя ($r_{xy} = 0,955$; $p < 0,001$), и в $(1,071 \pm 0,003)$ раза, на $(0,041 \pm 0,002)$ мкг/мг, больше показателя КГ ($r_{xy} = 0,977$; $p < 0,001$). В миокарде ЛЖС концентрация НК колебалась в пределах $(0,659 \pm 0,004)$ мкг/мг – в $(1,055 \pm 0,001)$ раза, на $(0,034 \pm 0,001)$ мкг/мг была больше 20-суточного показателя ($r_{xy} = 0,993$; $p = 0,001$), и в $(1,040 \pm 0,001)$ раза, на $(0,025 \pm 0,001)$ мкг/мг – больше, чем в КГ ($r_{xy} = 0,998$; $p = 0,001$). Концентрация НК в миокарде ЛЖС в $(1,074 \pm 0,002)$ раза была больше ($r_{xy} = 0,969$; $p < 0,001$), чем в ПЖС.

После 60-суточного эксперимента масса тела увеличилась до $(305,4 \pm 2,5)$ г – в $(1,112 \pm 0,010)$ раза ($r_{xy} = 0,951$; $p = 0,001$). Масса миокарда ПЖС была в $(1,107 \pm 0,003)$ раза больше ($r_{xy} = 0,985$; $p = 0,001$) 40-суточного показателя и составляла $(0,190 \pm 0,002)$ г. В сравнении с контролем масса миокарда ПЖС увеличилась в $(1,076 \pm 0,016)$ раза ($r_{xy} = 0,968$; $p = 0,047$). Масса миокарда ЛЖС составляла $(0,526 \pm 0,004)$ г, что в $(1,097 \pm 0,002)$ раза больше 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,999$; $p < 0,001$) и в $(1,037 \pm 0,007)$ раза ($r_{xy} = 0,985$; $p = 0,05$) больше, чем в КГ. Масса миокарда ЛЖС была в $(2,761 \pm 0,012)$ раза больше ($r_{xy} = 0,985$; $p < 0,001$), чем в ПЖС.

На 60-е сутки эксперимента в миокарде ПЖС концентрация НК колебалась в пределах $(0,678 \pm 0,005)$ мкг/мг – в $(1,107 \pm 0,004)$ раза, на $(0,048 \pm 0,002)$ мкг/мг больше 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,898$; $p < 0,001$), и в $(1,076 \pm 0,002)$ раза, на $(0,048 \pm 0,001)$ мкг/мг больше показателей КГ ($r_{xy} = 0,971$; $p = 0,001$). В миокарде ЛЖС концентрация НК была в пределах $(0,723 \pm 0,003)$ мкг/мг, что в $(1,100 \pm 0,002)$ раза, на $(0,034 \pm 0,001)$ мкг/мг было больше 40-суточного показателя ($r_{xy} = 0,953$; $p < 0,001$), и в $(1,042 \pm 0,001)$ раза, на $(0,029 \pm 0,001)$ мкг/мг в сравнении с контролем ($r_{xy} = 0,976$; $p = 0,001$).

Концентрация НК в миокарде ЛЖС была в $(1,067 \pm 0,004)$ раза больше ($r_{xy} = 0,951$; $p = 0,001$), чем в ПЖС.

После 60 суток ежедневной физической нагрузки в виде дозированного принудительного бега в миокарде ПЖС концентрация НК была в $(1,343 \pm 0,004)$ раза, на $(0,173 \pm 0,002)$ мкг/мг больше ИП ($r_{xy} = 0,986$; $p < 0,001$), а в миокарде ЛЖС – в $(1,312 \pm 0,004)$ раза, на $(0,172 \pm 0,001)$ мкг/мг соответственно.

Проведенное исследование показало, что в КГ масса миокарда ПЖС и ЛЖС изменялась прямо пропорционально возрастному увеличению массы тела крыс. К 60-м суткам эксперимента крысы КГ весили в среднем в 1,36 раза больше, чем в начале наблюдения. Статистически значимо установлено, что масса миокарда ПЖС и ЛЖС в среднем увеличилась соответственно в 1,31 и 1,33 раза по сравнению с исходным показателем (ИП).

К 60-м суткам в КГ возрастное увеличение массы миокарда ПЖС и ЛЖС статистически значимо влияло на цитофизиологическую активность изменением сорбционной способности НК. Концентрация НК в миокарде ПЖС была в 1,25 раза выше, чем у ИП, а в миокарде ЛЖС – в 1,26 раза выше. Увеличение концентрации НК во все фиксированные сроки наблюдения (20, 40 и 60 суток) было прямо пропорционально увеличению массы миокарда желудочков сердца.

У крыс ОГ после 60 суток ежедневных физических нагрузок масса миокарда ЛЖС была значимо больше, чем в ПЖС. Однако в сравнении с контрольными показателями сорбционная способность миокарда ПЖС была выше, чем в ЛЖС. Концентрация НК в миокарде желудочков сердца крыс ОГ значительно превышала возрастное увеличение, наблюдаемое у крыс КГ. В немногочисленных исследованиях сорбционной способности тканей и органов указывается на связь увеличения концентрации НК с замедлением выведения красителя [13]. Учитывая выраженную гипертрофию миокарда ЛЖС, можно гипотетически предположить, что изменение в ЛЖС сорбционной способности, характеризующей цитофизиологическую активность, по сравнению с ПЖС связано с особенностями кровоснабжения гипертрофированного миокарда ЛЖС.

Изменения в миокарде желудочков сердца, вызванные физической нагрузкой в виде дозированного принудительного бега, имеют практическое значение для понимания происходящих процессов при разработке программы физических тренировок для лечения сердечно-сосудистых заболеваний [4]. Оптимальные показатели изменений массы и сорбционной способности миокарда ПЖС и ЛЖС в проведенном исследовании были установлены после 20-суточной ежедневной дозированной физической нагрузки. В этой связи при планировании длительности физических тренировок [8] необходима индивидуализация распределения нагрузок с учетом физического и психосоматического

состояния пациентов. Экстраполируя результаты исследования на здоровых людей, следует учитывать, что для предотвращения негативного воздействия на сердечно-сосудистую систему, продолжительность таких тренировок не должна превышать 20 суток и осуществляться под медицинским контролем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

У крыс регулярные 60-суточные дозированные физические нагрузки в виде принудительного бега приводят к разнонаправленным изменениям цитофизиологической активности миокарда. При этом в правом желудочке сердца преобладает эффект сорбции. Гипертрофия миокарда левого желудочка негативно сказывается на цитофизиологической активности миокарда, что проявляется в снижении сорбционной способности миокарда в отношении витального красителя (нейтрального красного). При экстраполяции на здоровых людей, с учетом полученных в процессе исследования данных, установили, что продолжительность физической нагрузки не должна превышать 20 суток и должна осуществляться под медицинским контролем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гуцол Л.О., Гузовская Е.В., Серебrenникова С.Н., Семинский И.Ж. Стресс (общий адаптационный синдром): лекция. *Байкальский медицинский журнал*. 2022;1(1):70–80.
2. Малокова Т.И. Реакция сердечно-сосудистой системы на стрессовые воздействия. *Современные проблемы науки и образования*. 2020;6. doi: <https://doi.org/10.17513/spno.30248>.
3. Leo D.G., Ozdemir H., Lane D.A., Lip G.Y.H., Keller S.S. et al. At the heart of the matter: how mental stress and negative emotions affect atrial fibrillation. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2023;10:171647. doi: 10.3389/fcvm.2023.1171647.
4. Бартош-Зеленая С.Ю., Найден Т.В., Бартош-Зеленый А.А. Физические нагрузки и нарушения ритма: принципы диагностики и рекомендации. *Кардиология: новости, мнения, обучение*. 2021;9(2):21–31.
5. Вахтин В.Е., Давыдов М.В., Шенин К.А., Нестеров Д.Р. Влияние спортивных нагрузок различной интенсивности на здоровье сердечно-сосудистой системы. *Актуальные исследования*. 2023;161(31):71–73. URL: <https://apni.ru/article/6836-vliyanie-sportivnikh-nagruzok-razlichnoj-inte>.
6. Шумов А.В., Краева Н.В., Макарова В.И. Влияние физической нагрузки на электрофизиологические процессы в миокарде желудочков у детей-спортсменов. *Российский вестник перинатологии и педиатрии*. 2023;68(1):67–73. doi: 10.21508/1027-4065-2023-68-1-67-73.
7. Анцыгина Л.Н., Кордагова П.Н. Принципы реабилитации больных ишемической болезни сердца после хирургической реваскуляризации миокарда. *Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация*. 2020;2(2):190–199. doi: 10/36425/rehab34111.
8. Husheng Li, Minqian Wei, Zhang Li, Huang Lan, Yiyan Wang, Jiaqi Wang, et al. Factors contributing to exercise tolerance

in patients with coronary artery disease undergoing percutaneous coronary intervention. *BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation*. 2023;15:35. doi: 10.1186/s13102-023-00640-4.

9. Li Y., Feng X., Chen B., Liu H. Retrospective analysis of exercise capacity in patients with coronary artery disease after percutaneous coronary intervention or coronary artery bypass graft. *International Journal of Nursing Sciences*. 2021;8:257–263.

10. Сотников О.С., Васягина Т.И. Митохондрии кардиомиоцитов после избыточной физической нагрузки. *Кардиологический вестник*. 2022;17(3):44–50. doi: 10.17116/Cardiobulletin20221703144.

11. Кормилицына М.А., Голубева Е.К., Пахрова О.А., Алексахин Е.Л. Влияние максимальной мышечной нагрузки на гемостаз у крыс. *Современные вопросы биомедицины*. 2023;7(3). doi: 10.24412/2588-0500-2023_07_03_9.

12. Малышев И.И., Альпидовская О.В., Романова А.П. Влияние физической нагрузки различной степени интенсивности на гипертрофию кардиомиоцитов и на полиплоидию миокарда крыс. *Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины*. 2024;39(1):178–183. doi: 10.29001/2073-8552-2024-39-1-178-183.

13. Виноградов А.А., Андреева И.В., Воронкова Л.О. Влияние хронического предаторного стресса на сорбцию тонкой кишки и печени. *Современные вопросы биомедицины*. 2024;8(3). doi: 10.24412/2588-0500-2024_08_03_5.

14. Реброва О.Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Медиа Сфера, 2002. 305 с.

REFERENCES

1. Gutsol L.O., Guzovskaya E.V., Serebrennikova S.N., Seminsky I.I. Stress (general adaptation syndrome): lecture. *Baikal'skii meditsinskii zhurnal = Baikal Medical Journal*. 2022;1(1):70–80. (In Russ.).

2. Malyukova T.I. The reaction of the cardiovascular system to stress. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*. 2020;6. (In Russ.). doi: <https://doi.org/10.17513/spno.30248> (date of access: 03/25/2025).

3. Leo D.G., Ozdemir H., Lane D.A., Lip G.Y.H., Keller S.S. et al. At the heart of the matter: how mental stress and negative emotions affect atrial fibrillation. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. 2023;10:171647. doi: 10.3389/fcvm.2023.1171647.

4. Bartosh-Zelenaya S.Yu., Nayden T.V., Bartosh-Zeleny A.A. Physical activity and rhythm disturbances: principles of diagnosis and recommendations. *Kardiologiya: novosti, mneniya, obuchenie = Cardiology: news, opinions, training*. 2021;9(2):21–31. (In Russ.).

5. Vakhtin V.E., Davydov M.V., Shenin K.A., Nesterov D.R. The effect of sports loads of varying intensity on the health of

the cardiovascular system. *Aktual'nye issledovaniya = Current research*. 2023;161(31):71–73. (In Russ.) URL: <https://apni.ru/article/6836-vliyanie-sportivnikh-nagruzok-razlichnoj-inte>.

6. Shumov A.V., Kraeva N.V., Makarova V.I. The effect of physical activity on electrophysiological processes in the ventricular myocardium in child athletes. *Rossiiskii vestnik perinatologii i pediatrii = Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2023;68(1):67–73. (In Russ.) doi: 10.21508/1027-4065-2023-68-1-67-73.

7. Antsygina L.N., Kordatova P.N. Principles of rehabilitation of patients with coronary heart disease after surgical myocardial revascularization. *Fizicheskaya i reabilitatsionnaya meditsina, meditsinskaya reabilitatsiya = Physical and rehabilitation medicine, medical rehabilitation*. 2020;2(2):190–199. (In Russ.) doi: 10/36425/rehab34111.

8. Husheng Li, Minqian Wei, Zhang Li, Huang Lan, Yiyang Wang, Jiaqi Wang, et al. Factors contributing to exercise tolerance in patients with coronary artery disease undergoing percutaneous coronary intervention. *BMC Sports Science Medicine and Rehabilitation*. 2023;15:35. doi: 10.1186/s13102-023-00640-4.

9. Li Y., Feng X., Chen B., Liu H. Retrospective analysis of exercise capacity in patients with coronary artery disease after percutaneous coronary intervention or coronary artery bypass graft. *International Journal of Nursing Sciences*. 2021;8:257–263.

10. Sotnikov O.S., Vasyagina T.I. Mitochondria of cardiomyocytes after excessive physical activity. *Kardiologicheskii vestnik = Cardiological Bulletin*. 2022;17(3):44–50. (In Russ.) doi: 10.17116/Cardiobulletin20221703144.

11. Kormilitsyna M.A., Golubeva E.K., Pakhrova O.A., Aleksakhin E.L. The effect of maximum muscle load on hemostasis in rats. *Sovremennye voprosy biomeditsiny = Modern issues of biomedicine*. 2023;7(3). (In Russ.). doi: 10.24412/2588-0500-2023_07_03_9.

12. Malyshev I.I., Alpidovskaya O.V., Romanova A.P. The effect of physical activity of varying degrees of intensity on cardiomyocyte hypertrophy and myocardial polyplodia in rats. *Sibirskii zhurnal klinicheskoi i eksperimental'noi meditsiny = Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine*. 2024;39(1):178–183. (In Russ.) doi: 10.29001/2073-8552-2024-39-1-178-183.

13. Vinogradov A.A., Andreeva I.V., Voronkova L.O. The effect of chronic compensatory stress on sorption of the small intestine and liver. *Sovremennye voprosy biomeditsiny = Modern issues of biomedicine*. 2024;8(3). (In Russ.) doi: 10.24412/2588-0500-2024_08_03_5.

14. Rebrova O.Y. Statistical analysis of medical data. Application of the STATISTICA software package. Moscow; Media Sphere, 2002. 305 p. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Этические требования соблюдены. Текст не сгенерирован нейросетью.

Информация об авторах

Александр Анатольевич Виноградов – доктор медицинских наук, профессор кафедры анатомии, Рязанский государственный медицинский университет, Рязань, Россия; ✉ alexanvin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0441-7121>

Ирина Владимировна Андреева – доктор медицинских наук, профессор кафедры клинической ультразвуковой и функциональной диагностики, Московский областной научно-исследовательский клинический институт имени М.Ф. Владимирского, Москва, Россия; prof.andreeva.irina.2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6946-3036>

Павел Игоревич Смотаев – преподаватель кафедры физического воспитания, лечебной физкультуры и спортивной медицины, Рязанский государственный медицинский университет, Рязань, Россия; pavel.samotayev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7623-3676>

Таиса Александровна Бадинова – студентка 6-го курса, Луганский государственный медицинский университет, Луганск, Россия; badinovataisa@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9597-9403>

Статья поступила в редакцию 10.07.2025; одобрена после рецензирования 20.08.2025; принята к публикации 20.08.2025.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Ethical requirements are met. The text is not generated by a neural network.

Information about the authors

Alexander A. Vinogradov – MD, Professor of the Department of Anatomy, Ryazan State Medical University, Ryazan, Russia; ✉ alexanvin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0441-7121>

Irina V. Andreeva – MD, Professor, Department of Clinical Ultrasound and Functional Diagnostics, Moscow Regional Scientific Research Clinical Institute named after M.F. Vladimirovsky, Moscow, Russia; prof.andreeva.irina.2012@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6946-3036>

Pavel I. Samotayev – Lecturer at the Department of Physical Education, Physical Therapy and Sports Medicine, Ryazan State Medical University, Ryazan, Russia; pavel.samotayev@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7623-3676>

Taisa A. Badinova – 6th year student, Lugansk State Medical University, Lugansk, Russia; badinovataisa@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9597-9403>

The article was submitted 10.07.2025; approved after reviewing 20.08.2025; accepted for publication 20.08.2025.