

16. Фомина, К.А. Динамика массы тела, массы мозга половозрелых крыс и органомерических показателей гипофиза после двухмесячного воздействия тиотриазолина / К.А. Фомина, В.В. Сикора // Вестник Сумского государственного университета. Серия Медицина. – 2009. – № 2. С. 34-40.
17. Фомина, К.А. Эффекты тиотриазолина на морфогенез гипоталамуса крыс различного возраста в условиях хронической интоксикации эпихлоридрином / К.А. Фомина // Морфологический альманах имени В.Г. Ковешникова. – 2021. – Т. 19, № 4. С. 80-86.
18. Фомина, К.А. Морфогенез щитовидной железы крыс после коррекции тиотриазолином двухмесячного воздействия эпихлоридрина в различные возрастные периоды / К.А. Фомина // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Медицинские науки. – 2022. – Т. 4, № 64. – С. 74-83. DOI:10.21685/2072-3032-2022-4-8

REFERENCES

1. Belik IA, Luzin VI, Grischuk MG. Effect of thiotriazoline and tincture of echinacea purpurea on ultramicroscopic parameters of the adrenal glands of mature male rats. Astrakhan: Astrakhan State Medical University. 2016:49-2. (In Russ.)
2. Bibik EYu, Fomina KA, Yushchak MV. Thiotriazoline is a potential drug with detoxification activity. Ukrainian medical almanac. 2009;12(1):213-5. (In Russ.)
3. Voloshin VN, Voloshina IS, Kozhemyaka IYa [et al.] Effects of thiotriazoline on the structure of the thymus of white rats under the conditions of inhalation exposure to toluene. Grodno State Medical University. 2019:20-5. (In Russ.)
4. Voloshin VN. Effects of thiotriazoline on the organometric parameters of the spleen of white rats under the inhalation effect of epichlorohydrin. Current issues of modern science. 2015;1(5):13-6 (In Russ.)
5. Voloshina IS. Morphological changes in the structure of rat testicles under the influence of epichlorohydrin vapors and their correction with thiotriazoline. Journal of Anatomy and Histopathology. 2017;6(4):9-6. (In Russ.)
6. Gavrilov VA, Luzin VI. Age-related features of the growth and shaping of the mandible in white rats after 60 days of exposure to toluene vapor and the use of thiotriazoline or tincture of echinacea purpurea. Ukrainian morphological almanac. 2014;12(2):109-4. (In Russ.)
7. Kastanayan AA, Kartashova EA, Zheleznyak EI. The effect of thiotriazoline on energy formation processes in conditions of chronic myocardial ischemia. The South Russian Journal of Therapeutic Practice. 2020;1(1):84-7. (In Russ.)
8. Koveshnikov VG, Fomina KA, Voloshin VN [et al.] Experimental study of the effect of thiotriazoline on organs and body systems. Zaporozhskiy Medical Journal. 2010;12(5):174-3. (In Russ.)
9. Kokovina YuV, Chirkina TM, Antonova EA. [et al.] Efficacy and safety of therapy with Thiotriazoline® in peskovid patients with hepatocardial complications in the outpatient unit. Polyclinic. 2022;6-2:37-5. (In Russ.)
10. Lugovskoy DA. Morphometric parameters of the incisor of the lower jaw of sexually mature rats when inhaled with toluene vapor and used as correctors of thiotriazoline and tincture of echinacea purpurea. Ukrainian morphological almanac. 2012;10(2):62-3. (In Russ.)
11. Luzin VI, Voloshin VN, Kozhemyaka IYa. [et al.] The effect of thiotriazoline on the organometric parameters of the thymus of immature rats exposed to epichlorohydrin. Ukrainian morphological almanac. 2015;13(1):32-5. (In Russ.)
12. Melnikova VM, Sapegin ID. Comparative analysis of the effect of thiotriazoline and a new derivative of triazole - thiometrizole on cerebral circulation and oxygen balance of the brain in modeling transient disorders of cerebral circulation using antiorthostatic hypokinesia and general broadband vibration. Crimean Journal of Experimental and Clinical Medicine. 2018;8(3):43-9. (In Russ.)
13. Potupchik T, Veselova O, Evert L, Averyanova O. Application of the cytoprotector Thiotriazoline® in cardiological practice. Doctor. 2015;5:52-3. (In Russ.)
14. Salivonchik DP, Khudiyakov IA, Menshakova MN. [et al.] Therapy and hospital mortality in patients with COVID-19: metabolic efficacy of Thiotriazoline. Medical news. 2022;4(331):67-5. (In Russ.)
15. Fomina KA, Zakharov AA, Luzin VI. [et al.] Morphofunctional characteristics of the brain of rats of various ages after prolonged use of antioxidants. Materials of the II International Scientific and Practical conference «Borodino Readings» dedicated to the 85th anniversary of Novosibirsk State Medical University. Novosibirsk: Novosibirsk State Medical University. 2020:231-10. (In Russ.)
16. Fomina KA, Sikora VV. Dynamics of body weight, brain mass of mature rats and organometric parameters of the pituitary gland after two months of exposure to thiotriazoline. Bulletin of Sumy State University. The Medicine series. 2009;2:34-6. (In Russ.)
17. Fomina KA. Effects of thiotriazoline on the morphogenesis of the hypothalamus of rats of various ages under conditions of chronic epichlorohydrin intoxication. V.G. Koveshnikov Morphological almanac. 2021; 19(4):80-7. (In Russ.)
18. Fomina KA. Morphogenesis of the thyroid gland of rats after correction with thiotriazoline of two-month exposure to epichlorohydrin in various age periods. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Meditsinskie nauki = University proceedings. Volga region. Medical sciences. 2022; 4 (64):74-10 (in Russ.). DOI:10.21685/2072-3032-2022-4-8.

УДК 57.084.1

© Коллектив авторов, 2024

А.И. Лебедева, Л.А. Мусина, Р.З. Кадыров,
А.М. Дусалимова, М.Ф. Галаутдинов, И.В. Сироткина
**СТИМУЛИРОВАНИЕ АКТОПРОТЕКЦИИ
ПОСЛЕ ВЫНУЖДЕННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЛОГЕННОГО БИОМАТЕРИАЛА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

*Всероссийский центр глазной и пластической хирургии ФГБОУ ВО «Башкирский
государственный медицинский университет» Минздрава России, г. Уфа*

Основной мишенью при вынужденной физической нагрузке является мышечная система. Аллогенный биоматериал (БМА) для коррекции патологических изменений мышц ранее не применялся, не был обоснован способ его введения.

Целью исследования явилось определение патоморфологических особенностей скелетной мышечной ткани после физической нагрузки и применения БМА при внутримышечном, акупунктурном и сочетанном введениях.

Материал и методы. В эксперименте использованы крысы - самцы линии Wistar (n=60), которые подвергались вынужденному плаванию с грузом 10% от массы тела в течение 30 суток. Затем крысам I (опытной) группы вводили суспензию БМА внутримышечно. Животным II (опытной) группы вводили БМА акупунктурно в биологически активные точки. В III (опытной) группе крысам вводили суспензию БМА внутримышечно и акупунктурно. В контрольных группах животных введен физиологический раствор по аналогичной схеме. Через 5- и 21-е сутки проведены тестирование толерантности к нагрузке, гистологическое исследование, морфометрический анализ.

Результаты. Длительное плавание с утяжелением приводит к пересокращению, некрозу и фиброзированию мышечных волокон. После применения БМА определялись признаки рабдомиогенеза и ангиогенеза, а также повышение толерантной нагрузки. Наиболее выраженный эффект наблюдался в I и III опытных группах.

Заключение. БМА способствует восстановлению мышечных волокон и ранней реабилитации при внутримышечном введении.

Ключевые слова: актопротекция, аллогенный биоматериал, регенерация, скелетная мышечная ткань, вынужденная физическая нагрузка.

A.I. Lebedeva, L.A. Musina, R.Z. Kadyrov,
A.M. Dusalimova, M.F. Galautdinov, I.V. Sirotkina
**STIMULATION OF ACTOPROTECTION
AFTER FORCED PHYSICAL EXERCISE AND THE USE
OF ALLOGENEIC BIOMATERIAL IN THE EXPERIMENT**

The main target during forced physical exercise is the muscular system. Allogeneic biomaterial (BMA) has not been previously used to correct pathological changes in muscles, and the method of its administration has not been substantiated.

The aim of the study was to determine the pathomorphological features of skeletal muscle tissue after physical exercise and the use of BMA with intramuscular, acupuncture and combined administrations.

Material and methods. Male Wistar rats (n=60) were subjected to forced swimming with a load of 10% of their body weight for 30 days. Then, in Group I (experimental), BMA suspension was administered intramuscularly. In Group II (experimental), BMA was administered using acupuncture into biologically active points. In Group III (experimental), BMA suspension was administered both intramuscularly and using acupuncture. Physiological solution was administered according to a similar scheme in control groups. After 5 and 21 days, tolerance load testing, histological examination, and morphometric analysis were performed.

Results. Long-term swimming with weights leads to overcontraction, necrosis, and fibrosis of muscle fibers. After the use of BMA, signs of rhabdomyogenesis, angiogenesis, and increased tolerance load were determined. The most pronounced effect was observed in Groups I and III.

Conclusion. BMA promotes muscle fiber restoration and early rehabilitation when administered intramuscularly.

Key words: actoprotection, allogenic biomaterial, regeneration, skeletal muscular tissue, forced physical activity.

Некоторые виды профессиональной деятельности связаны с повышенными физическими нагрузками, что может оказывать патологическое влияние на различные органы и системы. К таким системам относятся нервная, сердечно-сосудистая и мышечная. В первую очередь основной мишенью патоморфологических изменений оказываются скелетные мышцы [1].

При лечении биологически-активными веществами отсутствует таргетная направленность на поврежденную ткань и/или орган. При приеме известных актопротекторов, адаптогенов, витаминно-минеральных комплексов не учитывается степень и распространенность микротравм и травматизма в целом, хронических ишемических повреждений тканей и органов. Биологически активные вещества могут иметь низкую специфичность и биологическую активность, но высокую иммуногенность [2].

На базе ФГБУ «Всероссийский центр глазной и пластической хирургии» г. Уфы разработан аллогенный биоматериал (БМА), который представляет собой децеллюляризованный внеклеточный матрикс, производится из аутогенных кадаверных тканей. Он известен как стимулятор регенерации при локальном использовании [3]. Но влияние БМА на морфо-функциональное состояние тканей при его дистантном воздействии не определено, не обоснованы способ применения и рецептура введения в условиях такой усиленной физической нагрузки как плавание с отягощением в длительном режиме.

Целью исследования явилось выявление гистологических и функциональных особенностей скелетной мышечной ткани после вынужденной изнуряющей физической нагрузки и применения БМА при внутримышечном, акупунктурном и сочетанном (внутримышечном и акупунктурном) введении.

Материал и методы

Эксперимент был проведен на крысах-самцах линии Wistar массой 200-250 г (n=60). В качестве модели для исследования вынужденной физической нагрузки был выбран тест Порсолта с грузом 10% от массы тела [4].

При проведении эксперимента придерживались ранее описанной методики [5]. Все животные были рандомно поделены на три группы. Животным первой группы вводили суспензию БМА внутримышечно, во второй группе – акупунктурно, в третьей группе – внутримышечно и акупунктурно. Группы сравнения составили животные соответствующих контрольных групп, в которых крысам вводили физиологический раствор по аналогичным схемам. Для данного эксперимента БМА был произведен из сухожилий крыс и обработан согласно ТУ 42-2-537-87.

Через 5- и 21-е сутки после инъекций проведено тестирование толерантной нагрузки (мин.), морфологическое исследование бедренных и икроножных мышц. После выведения животных из эксперимента передозировкой паров хлороформа кусочки тканей фиксировали и обезвоживали в серии спиртов, заливали в парафин, делали срезы тканей, которые в дальнейшем окрашивали ге-

матоксилином и эозином и по Ван–Гизону [6]. Для получения срезов использовали микротом LEICA RM 2145 (Германия).

Для иммуногистохимических реакций на парафиновых срезах в качестве первых антител применяли MyoD в разведении 1:50 (клон 4H207) и CD 68 в разведении 1:300 (клон ED1) (Santa Cruz Biotechnology, США). Использовали иммуногистостейнер Leica Microsystems Bond™ (Германия), непрямую стрептавидин-биотиновую систему – детекции Leica BOND (Novocastra™, Германия), микроскоп Leica DMD 108 (Германия).

Электронномикроскопические исследования проводили в соответствии с описанными методиками [7], использовали ультратом EM UC 7 (Leica, Германия) и трансмиссионный микроскоп JEM-1011 (Jeol, Япония).

В полях зрения на поперечном сечении мышц измеряли общее количество некротизированных волокон, мышечных волокон (МВ) их среднюю площадь.

При статистической обработке результатов использовали непараметрические методы – ранговый дисперсионный анализ по Краскелу–Уоллесу – медиана (Me) и квартили (Q1 – 25%; Q3 – 75%), критерий Манна–Уитни для внутригруппового сравнения в программе Statistica 10,0.

Результаты исследования

Во всех трех опытных группах через 5- и 21-е сутки данные нагрузочного теста оказались статистически недостоверными (от $p > 0.13$ до $p > 0.66$). Также незначимыми (от $p > 0.15$ до $p > 0.99$) были и контрольные межгрупповые различия в этот же период. Уровни кратности между I, II, III опытными группами при условии использования БМА и соответствующими контрольными группами были выше, начиная с ранних сроков (5 суток) до окончания наблюдения (21-й день) (рис. 1).

В скелетных мышечных тканях бедренной и икроножных мышц в контрольных группах при морфологическом исследовании проявлялись признаки дистрофических изменений, что выражалось в наличии контрактур от III до IV степеней, мозаичного некроза мышечных волокон, которое сопровождалось воспалительно-клеточной инфильтрацией. Также наблюдались признаки нарушения микроциркуляции: венозное полнокровие, стаз эритроцитов в гемокапиллярах, их разрыв, кровотечение, межучочный отек.

Организация мышечных волокон на ультраструктурном уровне выражалась в потере поперечной исчерченности, дезорганизацией Z-, M-линий, разрывом и фрагментацией фибрилл.

Митохондрии были просветленные, набухшие за счет выраженной вакуолизации с лизисом крист. Каналы саркоплазматического ретикулома, терминальные цистерны саркоплазматической сети и межмиофибриллярные пространства были резко расширены. В них наблюдались липофусциновые гранулы. В отдаленные сроки (21 сутки) наблюдались признаки избыточного коллагенообразования – периваскулярный и интерстициальный фиброз (рис. 2).

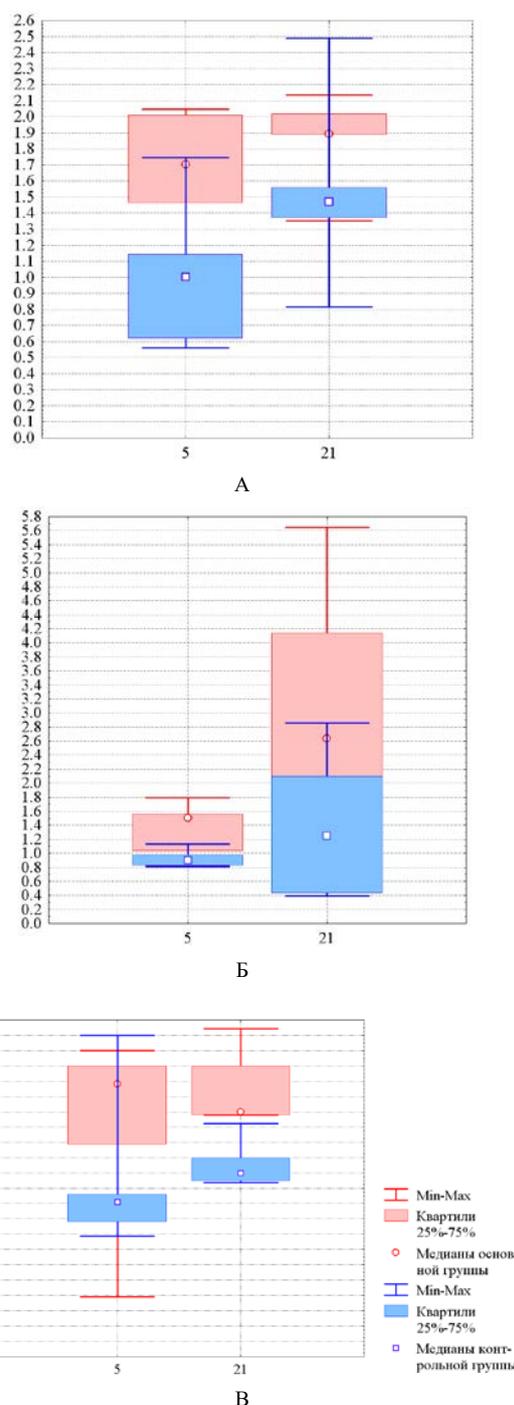


Рис. 1. Кратность длительности плавания крыс после изнуряющей физической нагрузки: А – внутримышечное введение БМА; Б – акупунктурное введение БМА; В – сочетанное введение БМА. По оси абсцисс – число дней. По оси ординат – кратность в долях единицы

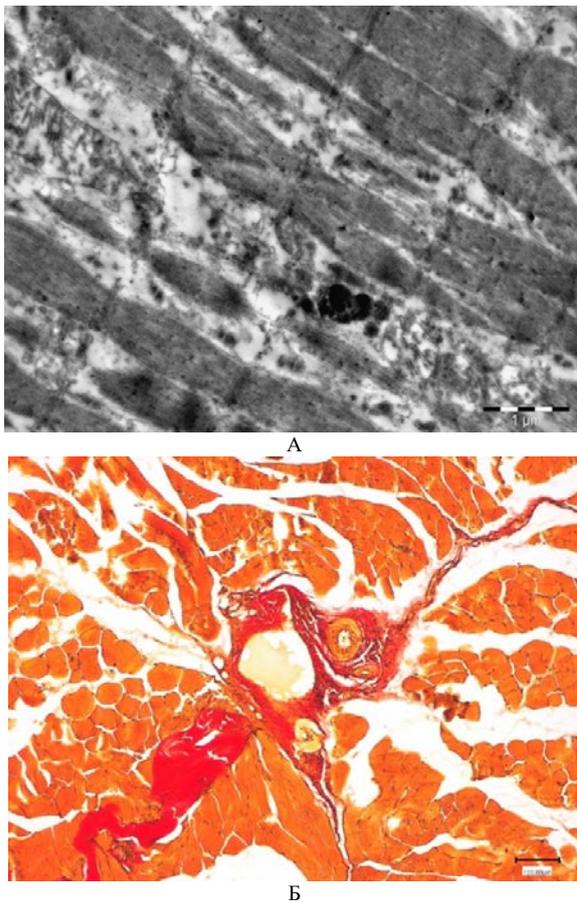


Рис. 2. Структура скелетной мышечной ткани бедренной мышцы в I контрольной группе: А – разрушение миофибрилл, набухание митохондрий, липофусциновые гранулы через 5 суток (электроннограмма); Б – периваскулярный и интерстициальный фиброзы через 21 сутки. Окраска по Ван-Гизону

Спустя 5 суток после введения БМА в I опытной группе обнаруживались признаки рабдомиогенеза и гиперплазии мышечных волокон, уменьшение количества некротически поврежденных мышечных волокон по сравнению с контрольной группой. В мышечных волокнах отмечалась полигональность профилей. Отёчных и воспалительных явлений в интерстициальном и периваскулярном пространствах не выявлено. Кровеносные сосуды артериального и венозного русла были без особенностей. Их просветы свободные, признаки сладжа и стаза эритроцитов отсутствовали. Частицы БМА подвергались постепенному лизису, деструкции и фагоцитозу макрофагами и, спустя 21 сутки не обнаруживались. Морфологическая структура мышечной ткани была без патоморфологических признаков и приближена к интактной. Явления фиброза или избыточного отложения коллагена отсутствовали (рис. 3).

Во II опытной группе, спустя 5 суток, выявлялись признаки повреждения мышечных волокон и их активной ремоделиции. Наблюдались разрывы волокон и воспалительно-клеточная инфильтрация, набухание и

отек перимизиального и периваскулярного пространства. Отмечались высокое содержание миосателлитов и ядер миосимпластов, располагающихся в однорядные цепочки по периферии экстрафузальных мышечных волокон, а также миотубы. Сосуды микроциркуляторного русла обнаруживались со свободными просветами без признаков застойных явлений. Через 21 сутки в перимизиальном пространстве бедренной мышцы сохранялись воспалительно-клеточный инфильтрат, кровоизлияния. Повышенная ядерная активность наблюдалась в мышечных волокнах. По-прежнему присутствовали контрактурные изменения саркоплазмы.

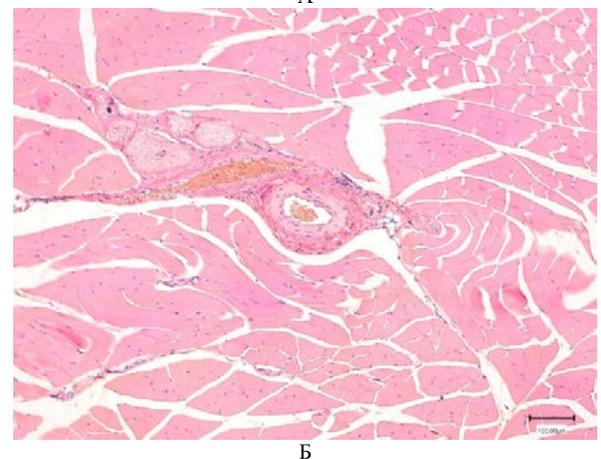
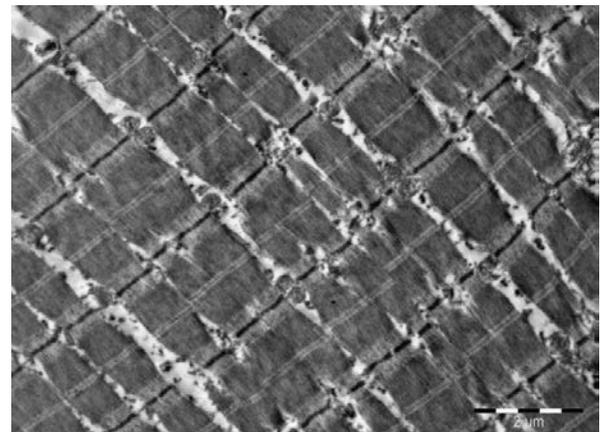


Рис. 3. Структура скелетной мышечной ткани бедренной мышцы в I опытной группе: А – регулярная поперечная исчерченность мышечных волокон через 5 суток (электроннограмма); Б – строение скелетной мышечной ткани через 21 суток. Окраска гематоксилином и эозином

В мышечной ткани у крыс III опытной группы патоморфологических признаков выявлено не было на всем протяжении наблюдения (от 5 до 21 суток). Ультраструктура мышечных волокон отражала сохранение энергетического баланса клеток и сократительных элементов. Признаки фиброза отсутствовали.

Средняя площадь поперечного сечения мышечного волокна в I и III опытных группах была меньше по сравнению со II опытной и

аналогичными контрольными группами спустя 21 сутки ($p > 0,12$).

Количество некротизированных мышечных волокон через 5 и 21 сутки после применения БМА во всех трех вариантах введения было достоверно ниже, чем в контрольных группах ($p < 0,04 - 0,006$).

Общая численность мышечных волокон при внутригрупповом сравнении была достоверно выше в I и III опытных группах по сравнению со II группой как в ранние, так и в отдаленные сроки после введения БМА. Межгрупповое сравнение показало, что в III опытной группе количество мышечных волокон было выше, чем в аналогичной контрольной ($p < 0,002$). Во II экспериментальной группе данный показатель оказался значимо выше,

чем в контрольной группе ($p < 0,007 - < 0,0001$) и значимо меньше в условиях применения БМА ($p < 0,0001$).

Миобласты MyoD^+ не определялись. Во всех трех опытных группах межгрупповая численность макрофагов CD68 через 5 суток оказалась статистически значимой ($\chi^2 = 29,7$, $p < 0,0001$) и выше, чем в соответствующих контрольных группах ($p < 0,0004$; $p < 0,0005$) соответственно. Количественные преимущества CD68⁺ клеток определялись в I и III опытных группах по сравнению со II опытной ($p < 0,0005$). Через 21 сутки CD 68⁺ клетки во всех экспериментальных группах выявлялись в единичных количествах и их численность в межгрупповом диапазоне статистически значимо не различалась (см. таблицу).

Таблица

Характеристика морфофункциональных особенностей скелетных мышц

Экспериментальные группы	Сроки, дни	Средняя площадь поперечного сечения МВ*, мкм ² ($p < 0,05$)	Количество некротизированных МВ* в полях зрения (Me; Xmax - Xmin)	Количество МВ* в полях зрения (Me (Q1; Q3))	Количество MyoD^+ -клеток (Me (Q1; Q3))	Количество CD 68-клеток (Me (Q1; Q3))
I опытная	5	1661,1±584,0	1 (0-2)	46,5 (42; 57,5)	0	12,7 (10,1; 13,2)
	21	748,3±213,3	0 (0-1)	88 (75; 92)	0	2,0 (1,5; 2)
II опытная	5	2246,0±432,7	2 (1-3)	37,5 (21; 26)	0	6,25 (5,5; 7)
	21	2060,7±442,0	1,5 (1-2)	37 (33; 46,5)	0	1 (1; 3)
III опытная	5	1868,6±443,3	1 (0-2)	46 (39; 50,5)	0	13,75 (12; 14,5)
	21	1360,2±438,0	0 (0-1)	67,5 (57; 69)	0	0,9 (1; 3)
I контрольная	5	1354,5±707,5	3 (1-4)	41,5 (31; 48,5)	0	3,4 (2,4; 3,5)
	21	1417,2±326,2	2	65,5 (56; 77)	0	1,2 (0,8; 1,3)
II контрольная	5	1521,0±598,0	3 (1-4)	58 (41,5; 65)	0	3 (2; 4)
	21	2033,2±506,9	2 (2-3)	51 (46; 52)	0	0,8 (1; 2)
III контрольная	5	1881,4±807,2	3 (2-5)	37,5 (32,5; 40,5)	0	1,83 (1; 2)
	21	1518,4±514,1	2 (1-3)	52,5 (40,5; 73)	0	1 (1; 2)

МВ* - мышечное волокно

Обсуждение

Данное исследование показало, что длительное плавание с утяжелением приводит к повреждению мышечных волокон в связи с их пересокращением, происходит разрыв сарколеммы, нарушение митохондриального аппарата, разрыв и лизис миофибрилл, что приводит к некрозу мышечного волокна с последующим замещением его коллагеновыми волокнами – фиброзу. Наряду с этим происходит нарушение микроциркуляции в ткани: дилатация кровеносных сосудов, микроразрывы, отек тканей.

Несмотря на то, что все крысы были одного возраста и пола, содержались в одинаковых условиях, питались одинаково и не были ранее обучены плаванию, уровень кратности плавания с утяжелением имел различия. Если внутригрупповой разброс значений не являлся статистически значимым, то межгрупповой анализ показал статистически достоверные отличия. Применение БМА при всех видах введения усиливало физическую выносливость.

Показано, что для более полноценного восстановления скелетных мышц наиболее эффективным является внутримышечное введение БМА в I и III опытных группах. Во II опытной группе (введение БМА акупунктурно) отмечены наличие воспалительно-клеточной инфильтрации, снижение численности мышечных волокон и повышение средней площади их поперечного сечения из-за отека. Определялся дефицит макрофагов CD68⁺. Однако длительность плавания при акупунктурном введении БМА также превышает контрольные значения в соответствующей группе. Вероятно, этому способствуют другие механизмы повышения выносливости. Известно, что перетренированность проявляется в нарушениях не только в скелетной, но и в нервно-мышечной и кардио-респираторной системах, в системе периферической крови, в изменениях метаболизма и иммунологической резистентности [8]. Распространена центрально-нервная теория утомления [9], поэтому в дальнейшем планируется исследовать влия-

ние БМА на другие органы и системы на фоне вынужденной изнуряющей нагрузки.

Аллогенный биоматериал является стимулятором регенерации посредством активации макрофагальных клеток, что подтверждается нашими исследованиями. В I и в III опытных группах количество макрофагов CD 68 значительно превышает данные в соответствующих контрольных группах.

Накопление продуктов окисления и клеточного детрита при повреждении мышечного волокна на фоне нарушения оксигенации тканей и иммунодефицита способствует развитию

реакций гиперчувствительности замедленного типа, которые заканчиваются фиброзом и, как следствие, нарушением функционирования органа [10]. Эффективный фагоцитоз макрофагами служит элиминацией антигенных детерминант, прекращению манифестации воспаления на фоне адекватного ангиогенеза [11;12].

Таким образом, применение суспензии диспергированного БМА в предлагаемых условиях позволяет ускорить восстановление скелетной мышечной ткани, сократить время реабилитации в условиях вынужденной физической нагрузки.

Сведения об авторах статьи:

Лебедева Анна Ивановна – д.б.н., в.н.с., зав. научно-исследовательского отдела морфологии ВЦГПХ ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450075, г. Уфа, ул. Р.Зорге, 67/1. E-mail: Jeol02@mail.ru.

Мусина Ляля Ахияровна – д.б.н., в.н.с. научно-исследовательского отдела морфологии ВЦГПХ ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450075, г. Уфа, ул. Р.Зорге, 67/1. E-mail: morphoplant@mail.ru.

Кадыров Радик Завилович – д.м.н., зам. директора по лечебной работе ВЦГПХ ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450075, г. Уфа, ул. Р.Зорге, 67/1. E-mail: radkad@yandex.ru.

Дусалимова Айгуль Маратовна – врач-невролог отделения восстановительной медицины ВЦГПХ ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450075, г. Уфа, ул. Р.Зорге, 67/1. E-mail: dusalim1977@gmail.com.

Галаутдинов Марс Фларитович – м.н.с. Института фундаментальной медицины ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450000, Уфа, ул. Ленина, 3. E-mail: mars.galautdinov@gmail.com.

Сироткина Инна Владимировна – научный сотрудник отдела нейрофизиологии ВЦГПХ ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России. Адрес: 450075, г. Уфа, ул. Р.Зорге, 67/1. E-mail: Sirotkinain@yandex.ru.

ЛИТЕРАТУРА

1. Скачков, Н.Г. Устранение и профилактика умственного и физического утомления / Н.Г. Скачков, В.А. Шкурдода // Термины и понятия в сфере физической культуры: I Междунар. конгресс. – СПб., 2007. – С. 360-361.
2. Plant Adaptogens-History and Future Perspectives./ V Todorova [et al.] // Nutrients. – 2021. – Vol. 13(8). – P. 2861. doi: 10.3390/nu13082861
3. Биоматериал для хирургии и способ его получения: патент № 2780831 Рос. Федерация; заявл. 17.05.2021, опубл. 04.10.2022. Бюл. № 28. 11 с.
4. Разработка методики оценки физической выносливости мелких лабораторных животных для изучения адаптогенной активности некоторых лекарственных препаратов / В.Н. Каркищенко [и др.] // Биомедицина. – 2011. – № 1. – С. 72-74.
5. Способ стимуляции акто-, кардио- и нейропротекции в условиях вынужденной физической нагрузки в эксперименте путем применения аллогенного биоматериала: патент № 2826978 Рос. Федерация; заявл. 14.03.2024, опубл. 19.09.2024. Бюл. № 26. 15 с.
6. Кор'як, В.А. Основы гистологической техники: учебное пособие / В. А. Кор'як, Л.А. Николаева. – ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, Институт сестринского образования. – Иркутск: ИГМУ, 2020. – 85 с.
7. Mascorro, A. Processing Biological Tissues for Ultrastructural Study / A. Mascorro, J. J. Bozzola. // Electron microscopy: methods and protocols. – 2007. – 2nd ed. – P. 19-34.
8. Lactate thresholds and role of nitric oxide in male rats performing a test with forced swimming to exhaustion / N. Potalitsyna [et al.] // Physiol Rep. – 2023. – Vol.11(17). – P. e15801. doi: 10.14814/phy2.15801.
9. Frequency of climbing behavior as a predictor of altered motor activity in rat forced swimming test / C. Vieira [et al.] // Neurosci Lett. – 2008. – Vol. 445(2). – P.170-173. doi: 10.1016/j.neulet.2008.09.001
10. Icing after eccentric contraction-induced muscle damage perturbs the disappearance of necrotic muscle fibers and phenotypic dynamics of macrophages in mice / M. Kawashima [et al.] // J Appl. – 2021. – Vol. 130(5). – P.1410-1420. doi: 10.1152/jappphysiol.01069.2020.
11. Icing after skeletal muscle injury with necrosis in a small fraction of myofibers limits inducible nitric oxide synthase-expressing macrophage invasion and facilitates muscle regeneration / I. Nagata [et al.] // Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol. – 2023. – Vol. 324(4). – P.574-588. doi: 10.1152/ajpregu.00258.2022;
12. Monocyte/macrophage interactions with myogenic precursor cells during skeletal muscle regeneration / M. Saclier [et al.] // FEBS J. – 2013. – Vol. 280(17). – P.4118-4130. doi: 10.1111/febs.12166.

REFERENCES

1. Skachkov N.G., Shkurdoda V.A. Elimination and prevention of mental and physical fatigue. Terms and concepts in the field of physical culture: I International Congress. St. Petersburg. 2007: 360–361. (in Russ)
2. Todorova V., Ivanov K., Delattre C., Nalbantova V., Karcheva-Bahchevanska D., Ivanova S. Plant Adaptogens-History and Future Perspectives. Nutrients. 2021;13(8):2861. doi: 10.3390/nu13082861. (in Russ)
3. Biomaterial dlja hirurgii i sposob ego poluchenija (Biomaterial for surgery and the method of its preparation): patent № 2780831 Ros. Federacija; zajavl. 17.05.2021, opubl. 04.10.2022. Bjul. № 28. 11 s. (in Russ)
4. Karkishchenko V.N., Kapanadze G.D., Dengina S.E., Stankova N.V. Development of a method for assessing the physical endurance of small laboratory animals to study the adaptogenic activity of some drugs. Biomedicine. 2011;1(1):72-74. (in Russ)
5. Sposob stimuljacji akto-, kardio- i nejroprotekcii v uslovijah vynuuzhdennoj fizicheskoj nagruzki v jeksperimente putem primenenija allogennogo biomateriala (Method of stimulation of act, cardio and neuroprotection under conditions of forced physical exertion in an experiment by using an allogeneic biomaterial): patent № 2826978 Ros. Federacija; zajavl. 14.03.2024, opubl. 19.09.2024. Bjul. № 26:15. (in Russ)
6. Kor'jak V. A., Nikolaeva L. A. Osnovy gistologicheskoj tehniki: uchebnoe posobie (Fundamentals of histological technique: a tutorial). Irkutsk: IGMU, 2020:85. (in Russ)
7. Mascorro A., Bozzola J. J. Processing Biological Tissues for Ultrastructural Study. Electron microscopy: methods and protocols. 2007. 2nd ed.:19-34. (in Engl)

8. Potolitsyna N., Parshukova O., Vakhnina N., Alisultanova N., Kalikova L., Tretyakova A., Chernykh A., Shadrina V., Duryagina A., Bojko E. Lactate thresholds and role of nitric oxide in male rats performing a test with forced swimming to exhaustion. *Physiol Rep.* 2023; 11(17):e15801. doi: 10.14814/phy2.15801. (in Engl)
9. Vieira C., De Lima T.C., Carobrez Ade P., Lino-de-Oliveira C. Frequency of climbing behavior as a predictor of altered motor activity in rat forced swimming test. *Neurosci Lett.* 2008;445(2):170-173. doi: 10.1016/j.neulet.2008.09.001. (in Engl)
10. Kawashima M., Kawanishi N., Tominaga T., Suzuki K., Miyazaki A., Nagata I., Miyoshi M., Miyakawa M., Sakuraya T., Sonomura T., Arakawa T. J Appl Physiol Icing after eccentric contraction-induced muscle damage perturbs the disappearance of necrotic muscle fibers and phenotypic dynamics of macrophages in mice. 2021; 130(5):1410-1420. doi: 10.1152/jappphysiol.01069.2020. (in Engl)
11. Nagata I., Kawashima M., Miyazaki A., Miyoshi M., Sakuraya T., Sonomura T., Oyanagi E., Yano H., Arakawa T. Icing after skeletal muscle injury with necrosis in a small fraction of myofibers limits inducible nitric oxide synthase-expressing macrophage invasion and facilitates muscle regeneration. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2023; 324(4):R574-R588. doi: 10.1152/ajpregu.00258.2022. (in Engl)
12. Saclier M., Cuvellier S., Magnan M., Mounier R., Chazaud B. Monocyte/macrophage interactions with myogenic precursor cells during skeletal muscle regeneration. *FEBS J.* 2013; 280(17):4118-4130. doi: 10.1111/febs.12166. (in Engl)

УДК 611.08

© Коллектив авторов, 2024

О.К. Зенин¹, А.А. Сергиенко¹, Э.С. Кафаров², И.У. Вагабов²,
Л.А. Удочкина³, Б.Т. Куртусунов³, С.В. Федоров⁴, С.Т. Гусейнова⁵
**ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗНОГО ВИДА БИФУРКАЦИЙ
ВНУТРИОРГАННОГО АРТЕРИАЛЬНОГО РУСЛА
СЕРДЦА ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

¹ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

²ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова», г. Грозный

³ФГБОУ ВО «Астраханский государственный медицинский университет»

Минздрава России, г. Астрахань

⁴ФГБОУ ВО «Башкирский государственный медицинский университет»

Минздрава России, г. Уфа

⁵ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный медицинский университет»

Минздрава России, г. Махачкала

Цель исследования. Установить функциональные особенности разных видов бифуркаций внутриорганный артериальный русла сердца человека путем виртуального испытания их цифровых моделей, основанных на результатах морфометрии.

Материал и методы. С использованием компьютерных программ ANSYS и Vasculograph исследованы проводящая, распределительная и опорная функции цифровых моделей бифуркаций внутриорганный артериальный русла разного вида: первого, величина внутреннего диаметра проксимального сегмента (D) меньше суммы внутренних диаметров дистальных сегментов (dmax и dmin), $D < dmax + dmin$; нулевого, $D = dmax + dmin$; второго, $D > dmax + dmin$. Цифровые модели бифуркаций разного вида были построены на основании ранее проведенного морфометрического исследования коррозионных препаратов русла внутриорганный венечных артерий сердца.

Результаты. В ходе виртуального исследования функциональных особенностей цифровых моделей разного вида бифуркаций внутриорганный артериальный русла сердца установлено что разного вида бифуркации в неравной степени участвуют в выполнении проводящей, распределительной и опорной функций; основная роль в выполнении названных функций принадлежит бифуркациям 1-го вида у которых величина внутреннего диаметра проксимального сегмента (D) меньше суммы внутренних диаметров дистальных сегментов (dmax и dmin), $D < dmax + dmin$.

Заключение. В качестве морфометрического эталона нормального строения внутриорганный артериальный русла сердца можно использовать количественное соотношение бифуркаций разного вида.

Ключевые слова: сердце, русло венечных артерий, бифуркация, цифровые модели.

O.K. Zenin, A.A. Sergienko, E.S. Kafarov, I.U. Vagabov,
L.A. Udochkina, B.T. Kurtusunov, S.V. Fedorov, S.T. Guseinova

**STUDY OF FUNCTIONAL FEATURES
OF DIFFERENT TYPES OF BIFURCATIONS
OF THE INTRAORGANIC ARTERIAL BED
OF THE HEART BY MATHEMATICAL MODELING**

The aim of the study was to establish the functional characteristics of different types of bifurcations of the intraorganic arterial bed of the human heart by virtually testing their digital models based on the results of morphometry.

Material and methods. Using the ANSYS and Vasculograph computer programs, the conductive, distributive and supporting functions of digital models of bifurcations of the intraorganic arterial bed of different types were studied: the first, the value of the internal diameter of the proximal segment (D) is less than the sum of the internal diameters of the distal segments (dmax and dmin), $D < dmax + dmin$; zero, $D = dmax + dmin$; the second, $D > dmax + dmin$. Digital models of bifurcations of different types were constructed on the basis of a previously conducted morphometric study of corrosion preparations of the bed of the intraorganic coronary arteries of the heart.

Results. In the course of a virtual study of the functional features of digital models of different types of bifurcations of the intraorganic arterial bed of the heart, it was found that different types of bifurcations participate to an unequal extent in the performance of conductive, distributive and supporting functions; the main role in the performance of these functions belongs to bifurca-