in healthy adults / R. Albayrak [et al.] // J. Clin. Ultrasound. 2007. Vol. 35, № 1. P. 27–33.

6. Anatomical variations of the V2 segment of the vertebral artery / M. Bruneau [et al.] // Neurosurgery. 2006. Vol. 59, № 1. P. 20–24.

7. Paolini S., Lanzino G. Anatomical relationships between the V2 segment of the vertebral artery and the cervical nerve roots // J. Neurosurg. Spine. 2006. Vol. 5, № 5. P. 440–442.

8. A vertebral artery without atlantic and' intradural sections: a case report and a review of the literature / B. Cagnie [et al.] // Ann. Anat. 2005. Vol. 187, № 3. P. 271–275.

9. Bruneau M., Cornelius J.F., George B. Anterolateral approach to the VI segment of the vertebral artery // Neurosurgery. 2006. Vol. 58, № 4. P. 215–219.

10. Маркелова М.В. Анатомо-физиологические предпосылки нарушения кровообращения в системе вертебрально-базилярного бассейна // Омский научный вестник. 2008. Т. 65, № 1. С. 62–66.

11. Алексеев В.П. Остеометрия. М.: Наука, 1966. 251 с.

12. Зворыгин И.А. Статистический анализ лабораторных данных // Новости «Вектор-Бест»:.информ. бюл. № 1 (39), 2006. С. 36–75.

13. Маркелова М.В., Широченко Н.Д. Морфометрические параллели в строении отверстий поперечных отростков и позвоночных сосудов // Морфология. 2008. № 4. С. 80–81.

14. Лабзин В.И., Родионов А.А., Прозоров А.В. Особенности пространственного расположения отверстий (каналов) поперечных отростков на различных уровнях шейного отдела позвоночника // Морфология. 2008. Т. 133, № 2. С. 75–76.

15. Куртусунов, Б.Т. Анатомические особенности канала позвоночной артерии по данным компьютерной томографии // Морфология. 2008. Т. 133, № 4. С. 73–74.

16. Куртусунов Б.Т. Морфометрическая характеристика позвоночных артерий и их каналов на этапах постнатального онтогенеза человека // Астраханский медицинский журнал. 2010. Т. 5, № 2. С. 47–50.

Translit

1. Sitel' A. B., Teterina E.B. Nedostatochnost' krovoobrawenija v vertebral'no-baziljarnoj sisteme // Zhurn. nevrologii i psihiatrii im. S.S. Korsakova. 2003. № 8. S. 11–17.

2. Dravert N.E. Kliniko-dopplerograficheskie sopostavlenija u bol'nyh s vertebral'nym sindromom pozvonochnoj arterii ivertebral'no-baziljarnoj nedostatochnost'ju: avtoref. dis…. kand. med. nauk. Kirov: Izd-vo Permskoj gos. med. akad., 2004. 22 s.

3. Distances from the atlantal segment of the vertebral artery to the midline in children / R.S. Tubbs [et al.] // Pediatr. Neurosurg. 2003. Vol. 39, № 6. P. 330–334.

4. Anisimova E.A. Morfo-topometricheskoe obosnovanie hirurgicheskoj korrekcii deformacij pozvonochnogo stolba: avtoref. dis…. d-ra med. nauk. Saratov, 2009. 47 s.

5. Doppler sonography evaluation of flow velocity and volume of the extracranial internal carotid and vertebral arteries in healthy adults / R. Albayrak [et al.] // J. Clin. Ultrasound. 2007. Vol. 35, № 1. P. 27–33.

6. Anatomical variations of the V2 segment of the vertebral artery / M. Bruneau [et al.] // Neurosurgery. 2006. Vol. 59, № 1. P. 20–24.

7. Paolini S., Lanzino G. Anatomical relationships between the V2 segment of the vertebral artery and the cervical nerve roots // J. Neurosurg. Spine. 2006. Vol. 5, № 5. P. 440–442.

8. A vertebral artery without atlantic and' intradural sections: a case report and a review of the literature / B. Cagnie [et al.] // Ann. Anat. 2005. Vol. 187, № 3. P. 271–275.

9. Bruneau M., Cornelius J.F., George B. Anterolateral approach to the VI segment of the vertebral artery // Neurosurgery. 2006. Vol. 58, № 4. P. 215–219.

10. Markelova M.V. Anatomo-fiziologicheskie predposylki narushenija krovoobrawenija v sisteme vertebral'no-baziljarnogo bassejna // Omskij nauchnyj vestnik. 2008. T. 65, № 1. S. 62–66.

11. Alekseev V.P. Osteometrija. M.: Nauka, 1966. 251 s.

12. Zvorygin I.A. Statisticheskij analiz laboratornyh dannyh // Novosti «Vektor-Best»: Inform. bjul. № 1 (39), 2006. S. 36–75.

13. Markelova M.V., Shirochenko N.D. Morfometricheskie paralleli v stroenii otverstij poperechnyh otrostkov i pozvonochnyh sosudov // Morfologija. 2008. № 4. S. 80–81.

14. Labzin V.I., Rodionov A.A., Prozorov A.V. Osobennosti prostranstvennogo raspolozhenija otverstij (kanalov) poperechnyh otrostkov na razlichnyh urovnjah shejnogo otdela pozvonochnika // Morfologija. 2008. T. 133, № 2. S. 75–76.

15. Kurtusunov, B.T. Anatomicheskie osobennosti kanala pozvonochnoj arterii po dannym komp'juternoj tomografii // Morfologija. 2008. T. 133, № 4. S. 73–74.

16. Kurtusunov B.T. Morfometricheskaja harakteristika pozvonochnyh arterij i ih kanalov na jetapah postnatal'nogo ontogeneza cheloveka // Astrahanskij medicinskij zhurnal. 2010. T. 5, № 2. S. 47–50.

УДК 611.018.6:612.766.2 Оригинальная статья

ВЛИЯНИЕ ПОВТОРНОЙ АДАПТАЦИИ АТРОФИРОВАННЫХ МЫШЦ ГОЛЕНИ НА ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТАБОЛИЗМ

***М.А. Афанасьев** — ГБОУ ВПО Первый Московский ГМУ им. И.М. Сеченова Минздравсоцразвития России, кафедра гистологии, цитологии и эмбриологии, аспирант.*

RECURRING ADAPTATION EFFECT ON ENERGY METABOLISM OF ATROPHIC SHIN MUSCLES

***M.A. Afanasyev** — Moscow First Sechenov Medical University, Department of Histology, Cytology and Embryology, Post-graduate.*

Дата поступления — 22.11.2011 г. Дата принятия в печать — 05.06.2012 г.

***Афанасьев М.А.* Влияние повторной адаптации атрофированных мышц голени на их энергетический метаболизм // Саратовский научно-медицинский журнал. 2012. Т. 8, № 2. С. 181–185.**

Цель: поиск маркёров активности мышечных волокон гравитационно-зависимых мышц в условиях ранней постгипокинетической реадаптации. *Материал и методы.* Мышцы-антагонисты из области голени задних конечностей крысы. Проводили иммуногистохимическое окрашивание мышечных волокон разного типа (I и II) на гликоген и триглицериды. *Результаты.* Выявили динамические изменения внутриклеточного содержания исследуемых энергетических субстратов на разных сроках периода постгипокинетического восстановления. *Заключение.* Изучаемые субстраты могут являться адекватными функциональными маркёрами мышц в заданных условиях.

Ключевые слова: антиортостатическое вывешивание, постгипокинетическая реадаптация, мышечные волокна, триглицериды, гликоген.

***Afanasyev M.A.* Recurring adaptation effect on energy metabolism of atrophic shin muscles // Saratov Journal of Medical Scientific Research. 2012. Vol. 8, № 2. P. 181–185.**

The article is devoted to recurring adaptation effect on energy metabolism of atrophic shin muscles. *The purpose:* Investigation of markers of activity of muscular fibers of gravitation-dependent muscles in condition of early posthypokinetic readaptation. *Materials.* Muscles-antagonists have been taken from the shin area of hind limbs of a rat. *Methods.* Immunohistochemical dyeing of myofibrils of different type (I and II) on glycogen and triglycerides have been used.

Results. We have revealed dynamic changes of the endocellular contents of researched energy substrata on different terms of the period of posthypokinetic restoration. *Conclusion.* Investigated substrata my serve as adequate functional markers of muscles in the conditions under the study.

Key words: antiorthostatic suspension, posthypokinetic recurring adaptation, myofibrils, triglycerides, glycogen.

Введение. Пребывание человека в космических условиях вызывает «перестройку» многих процессов, протекающих в его функциональных системах, причём как компенсаторно-приспособительного, или адаптивного, так и патологического характера. Последние чаще возникают при продолжительном воздействии экстремальных условий. К невесомости наиболее восприимчива мышечная система. В связи с этим наибольшего внимания заслуживают изучение изменений, происходящих именно в данной системе, главным образом в форме развития гипогравитационного мышечного синдрома. При этом наблюдаются расстройства функциональных [1] и морфологических [2] свойств волокон и мышц в целом. Есть основание полагать, что одним (но, по-видимому, не единственным) из триггерных стимулов, запускающих каскад механизмов развития этого синдрома, является нейрогенный (центральный). Вместе с тем установление других возможных инициирующих факторов, а также более глубокое понимание патогенеза синдрома требуют дальнейшего изучения.

Следует особо подчеркнуть, что конечным результатом воздействия микрогравитации на мышцы является возникновение прежде всего их атрофии. Проведённый ряд исследований продемонстрировал влияние на атрофические процессы, протекающие в мышечных волокнах, сократительной активности последних. Метод электромиографии позволяет зафиксировать сократительную активность мышц, оценить ее в динамике (в т.ч. в условиях функциональной разгрузки лабораторных животных). Показано, например, что зарегистрированная с помощью электродов активность камбаловидной мышцы крысы падает, начиная уже с первых суток наземного моделирования функциональной разгрузки, постепенно возвращаясь к контрольным значениям спустя две недели [3]. Эти же авторы отметили противоположную динамику активности передней большеберцовой мышцы при аналогичных условиях. Одновременно с этим, недостатком данного метода, лимитирующего его применение, является невозможность оценки дифференциальной «работы» каждого из типов мышечных волокон. В этой связи нами была предпринята попытка оценить физиологическую «работу» медленно- и быстросокращающихся волокон мышц в отдельности по динамике изменения в них веществ — источников энергии: триглицеридов и гликогена. Кроме того, хорошо известно об изменении фенотипического состава мышечных волокон в процессе функциональной разгрузки [4]. Нужно отметить экспериментальное установление зависимости степени выраженности атрофии мышц задних конечностей после вывешивания лабораторных крыс от возраста животных [5].

В то же время исследованию ранее упомянутых параметров в условиях постгипокинетической реадаптации к настоящему времени уделяется, на наш взгляд, недостаточное внимание; общее число публикаций по данной проблеме минимально.

Таким образом, целью настоящей работы был поиск адекватных клеточных маркёров активности мышечных волокон гравитационно-зависимых мышц (камбаловидной (далее — *m. soleus*) и ее основного антагониста — передней большеберцовой (далее — *m. tibialis anterior*) на этапе раннего постгипокинетического восстановления (3 и 7 суток).

Методы. *Общая организация эксперимента.* Для исследования в лаборатории использовались интактные половозрелые белые крысы-самцы *Wistar*, средняя масса которых перед экспериментом составила 250–280 г (возраст около 2,5 мес.).

В экспериментальной серии использовали двадцать четыре лабораторных животных, которые случайным образом были поделены на четыре группы по 6 животных в каждой: группа контроля, группа двухнедельного АВ, группа 3-суточного периода восстановления после 14-суточного АВ, группа 7-суточной реадаптации после 14-суточного АВ.

Крысы содержались в стандартных условиях вивария (температура, влажность воздуха, 12-ти часовой цикл «свет-тьма»), и получали стандартный корм в соответствии с рационом для лабораторных животных и воду *ad libitum*. Все процедуры с животными в настоящем эксперименте были одобрены Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ — Института медико-биологических проблем РАН.

Моделирование гравитационной разгрузки задних конечностей крысы проводили путем вывешивания животного за хвост в специально оборудованной клетке (боксе) по методу Ильина — Новикова [6, 7] таким образом, чтобы задние конечности не касались земли, а передние — опирались на пол. Тело животного при этом располагалось под углом 45° к полу клетки. При этой методике разгрузки (антиортостатическое вывешивание) морфофункциональные изменения в скелетных мышцах задних конечностей напоминают таковые, возникающие при гипогравитационном двигательном синдроме.

Биопсийный материал из области мышц голени (по две *m. soleus* и *m. tibialis anterior* от каждой крысы) получали после наркотизации подопытных и контрольных животных Золетил® 50 (Virbac S.A., Франция). После забора необходимого материала осуществлялась эвтаназия животных путём внутрибрюшинного введения овердозы средства для наркоза. В процессе проведения вышеупомянутых манипуляций ни в одном случае не было зарегистрировано осложнений. Материалом для дальнейшего исследования послужила поперечно-полосатая мышечная ткань мышц — функциональных антагонистов задних конечностей.

Способы получения материала. Способы получения тканей и их предварительная обработка были продиктованы требованиями гистохимии и необходимостью в дальнейшем производить количественную оценку изменений (морфометрия и статистический анализ изображений).

В работе использовались фрагменты скелетной мышечной ткани камбаловидной мышцы (разгибателя), являющейся у крысы мышцей позной (тонической), которая содержит в себе преимущественно медленные мышечные волокна, и краниальной большеберцовой мышцы (сгибателя), участвующей как в осуществлении произвольных движений (в основ-

Ответственный автор — Афанасьев Максим Александрович.
Адрес: 103009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр. 3.
Тел.: 909-968-1216.
E-mail: am-mma@mail.ru

ном), так и в поддержании позы (в меньшей степени) и состоящей из всех трех типов МВ (т.е. I, IIa и IIb).

После транспортировки животных и периода их адаптации они были переведены в положение АВ, продолжительность которого составила четырнадцать суток. Животные из группы контроля продолжали находиться в обычных клетках. Непосредственно перед взятием биологического материала — мышц голеней — была определена масса лабораторных крыс на электронных весах ScoutPro SPU601 (Китай). Под наркозом из обеих задних конечностей были выделены и тотально резецированы *m. soleus* и *m. tibialis anterior*, которые затем, после их предварительного взвешивания (определялся сырой, а через 24 часа нахождения в термостате (T=37°C; термостат ТС-80М-2) и сухой вес мышцы; контрольные измерения проводились на высокочувствительных механических весах WAGA TORSYJNA-WT, Techniprot, Польша), фиксировались с использованием тканевого клея Tissue-Tek® (OCT™ Compound 4583) на специально подготовленной подложке и немедленно замораживались в жидком азоте. Вплоть до обработки мышечные пробы (образцы) хранили при -80°C. На основе забранного мышечного материала в дальнейшем изготавливались гистологические препараты (серийные криостатные срезы толщиной 10 мкм каждый) в криостате модели CM 1900 фирмы Leica (Германия) при -22°C с последующим изучением субстратно-энергетических маркёров: гликогена (далее — Глн) и триглицеридов (далее — ТГ), — в МВ разного типа..

Иммуногистохимические методики (иммуногистохимия мышечных волокон). Для иммуногистохимического определения внутриклеточного содержания гликогена в волокнах изучаемых мышц использовались криостатные поперечные срезы мышечной ткани заданной толщины, предварительно изготовленные из замороженных образцов (проб). Изготовленные микропрепараты сушили, после чего фиксировали в рабочем растворе формальдегида (Formaldehyde 37–38% w/w stabilized with methanol, 1000 ml, № 141328.1211, Panreac Quimca Sau, Spain; разведение дистиллированной водой в соотношении 1:9) около 1 часа при температуре + 4ºC (в холодильнике). Для иммуногистохимического выявления (типирования) изоформ тяжёлых цепей миозина применялась иммунофлуоресцентная техника. После предварительного окрашивания на гликоген (1% раствор перйодной кислоты — shiff (PAS) staining system (№ 395–1, SIGMA-ALDRICH, Chemie, Steinheim, Германия, затем реактив Шиффа (№ 395–2, SIGMA-ALDRICH)) срезы инкубировали с первичными моноклональными ((Monoclonal Anti-Myosin (Skeletal, Slow) antibody produced in mouse, Sigma M8421–2 ml, разведение 1:30; Monoclonal Anti-Myosin (Skeletal, Fast) antibody produced in mouse, Sigma M4276–2 ml; разведение 1:30) после нанесения их на предметные стёкла помещали в термостат/37–38°C на 1 час) и вторичными поликлональными (на 30 мин в тёмное место) антителами против быстрых (MHC_{fast}) и медленных (MHC_{slow}) цепей миозина (a4843, Anti-FITC–Alkaline Phosphatase antibody produced in rabbit IgG fraction of antiserum, buffered aqueous glycerol solution). Срезы, которые инкубировали без первичных антител, использовались как контроль. Таким образом, иммуногистохимическое выявления полисахарида гликогена осуществлялось методом двойного мечения (как в быстрых, так и в медленных волокнах) (рис. 1, 2). Сразу же перед микроскопией исследуемые образцы заключали в 10% водный раствор глицерола (Химмед, Москва, Россия).

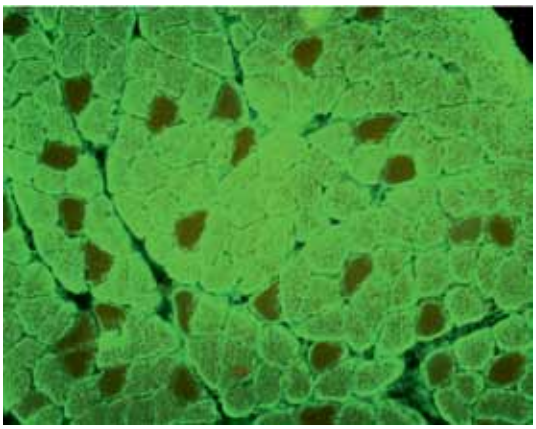

Рис. 1. Иммуногистохимическое типирование МВ и определение их ППС: фрагмент поперечного среза камбаловидной мышцы, окрашенный антителами против ТЦМ I типа

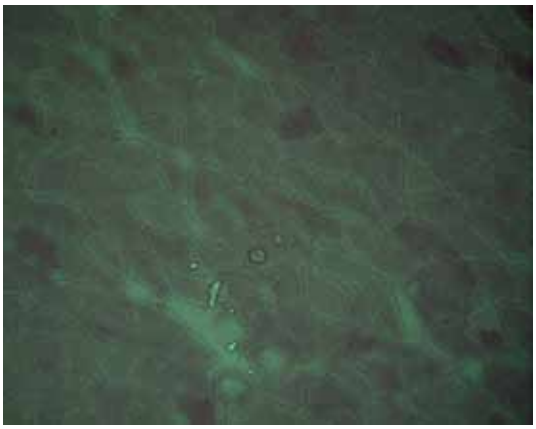

Рис. 2. Иммуногистохимическое выявление гликогена в МВ (PAS-реакция) камбаловидной мышцы, содержащей преимущественно ТЦМ I типа: световая микроскопия

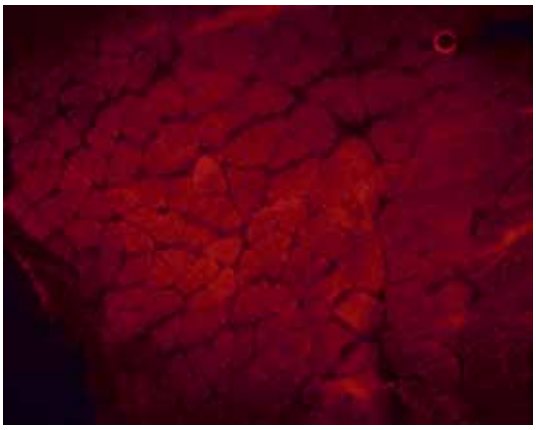

Рис. 3. Иммуногистохимическое выявление триглицеридов в МВ (реакция с OIL RED O) передней большеберцовой мышцы, содержащей преимущественно ТЦМ I и II типов

С целью иммуногистохимического выявления уровня ТГ в исследуемых МВ использовалось нанесение свежеприготовленного раствора OIL RED O (C26H24N4O; Sigma, Lot 73H3648, 0–0625; 100g) на предметные стёкла. Перед микроскопированием препараты заключали в 10% водный раствор глицерола (рис. 3).

Один и тот же гистологический срез скелетной мышцы фотографировали сначала в видимом свете (для выявления молекул Глн) или под фильтром с длиной волны 500–565 нм/зеленый спектр/(для выявления уровня ТАГ), а затем под фильтром с длиной волны пропускания 440–480 нм/синий спектральный цвет/(с целью дифференцировки типа МВ) флуоресцентного бинокулярного микроскопа Leica DMR (Германия), модель DC 300F, снабженного цветной цифровой видеокамерой JVC TK-1280E при 20-кратном увеличении и соединенного с персональным компьютером. Разрешение видеокамеры 720×512 пиксель с 8 бит/пиксель. Содержание энергетических субстратов в МВ разного типа проводили, наложив изображения, полученные под разными фильтрами друг на друга. Все измерения (анализ срезов) проводили на микрофотографиях с помощью программного обеспечения анализа изображений Quantimet 500M производства Leica (Германия). Фотометрическую калибровку проводили на чистом поле. При определении внутриклеточного уровня Глн компьютерной программой обработки полученных фотоснимков использовались т.н. единицы оптической плотности, а при определении уровня ТГ — единицы флуоресценции. Определение содержания гликогена анализировали не менее чем в 20 волокнах мышцы, взятой от каждого лабораторного животного.

Статистическая обработка и анализ. Обработку полученных в результате эксперимента данных производили, используя специальную компьютерную программу Leica QWin и пакет статистических программ Microsoft Excel. При статистическом анализе (сравнении) результатов использовались однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и парный t-критерий Стьюдента.

Различия средних значений исследуемого показателя между группами были признаны статистически значимыми (высокодостоверными) на уровне p≤0,05. Результаты представлены в виде M±m.

Результаты. *Сырой и сухой вес мышц голени.* Сырой вес передней большеберцовой мышцы снизился в среднем на 11 и 9% в группах 14-суточной антиортостатической разгрузки и последующего 3-суточного восстановления соответственно при сравнении со значениями, зафиксированными в контроле (различия между группами статистически значимы). На седьмые сутки периода восстановления это различие достоверно сократилось и составило 4%. Динамика изменения сухого веса передней большеберцовой мышцы изменялась почти пропорционально изменениям её сырого веса (отличия от контроля: на 15% для 14-суточного АВ и на 12% для трёхдневного восстановления; p≤0,05); в группе 7-суточной реадаптации эта разница составила около 8% от контроля.

В то же время в динамике сырого и сухого веса другой мышцы голени — камбаловидной, было отмечено следующее. Сырой вес камбаловидной мышцы был снижен в группах двухнедельной функциональной разгрузки и последующего трёхсуточного периода реадаптации (в среднем на 33 и 31% соответственно; p≤0,05) в сравнении с этим показателем, наблюдаемым в контрольной группе. На седьмые сутки восстановительного периода значение сырого веса отличалось от такового для группы «контроль» в среднем на 14% (p≤0,05). Близкие результаты были получены в динамике изменения сухого веса камбаловидной мышцы: по окончании 14-суточного АВ, равно как и после 3-суточного восстановления сухой вес данной мышцы был отличным от сухого веса, отмеченного в контроле в среднем на 32%. В конце седьмых суток периода послеразгрузочной реадаптации сухой вес мышцы оказался меньше на 27% по сравнению с таковым, полученным в контрольной группе (при p≤0,05).

Площадь поперечного сечения мышечных волокон. Двухнедельная гипокинезия приводит к снижению площади поперечного сечения мышечных волокон (далее — ППС МВ) обоих типов камбаловидной мышцы (в среднем на 57% для медленносокращающихся волокон (далее — МВ I типа) и на 52% для быстросокращающихся волокон (далее — МВ II типа) по сравнению с таковыми показателями в контроле; различия между группами высокодостоверны) и МВ I типа передней большеберцовой мышцы (в среднем на 16%; p≤0,05). Достоверных отличий ППС быстрых волокон передней большеберцовой мышцы почти во всех экспериментальных группах от контроля отмечено не было. В ходе трех- и семисуточной реадаптации отмечено постепенное увеличение ППС МВ обоих типов камбаловидной мышцы однако за этот период данный показатель к контрольным значениям не вернулся: достоверные отличия между контролем и семидневным периодом восстановления составили 23 и 42% для МВ I и II типа соответственно. В отношении передней большеберцовой мышцы разница между ППС МВ медленного типа в контроле и группе семидневного восстановления после функциональной антиортостатической нагрузки отмечена на уровне не выше 10% при p≤0,05. Абсолютные значения ППС МВ для обеих исследуемых мышц приведены в таблице.

Уровень содержания гликогена в волокнах мышц голени. В конце второй недели антиортостатической гипокинезии в МВ II типа передней большеберцовой мышцы и в волокнах обоих типов камбаловидной мышцы внутриклеточное содержание Глн не отличалось от такового в контроле (p≤0,05). В то же время к 3-м суткам периода постгипокинетической реадап-

ППС МВ (в мкм²) камбаловидной и передней большеберцовой мышц, окрашенных антителами против медленно- (МВ I типа) и быстросокращающихся (МВ II типа) волокон в различных экспериментальных группах

Мышца		Экспериментальные группы			
		Контроль	14-суточное АВ	3-суточное восстановление после 14-сут. АВ	7-суточное восстановление после 14-сут. АВ
m. soleus	МВ I	2533±87	1065±107 *	1797±37 */#	1962±51 */#
	МВ II	2312±96	1114±141 *	1132±40 *	1339±59 */#
m. tibialis anterior	МВ I	1377±62	1164±59 *	1240±35 *	1410±42 #
	МВ II	1649±49	1742±62	1708±39	1546±73 #

Примечание: * — достоверное отличие от группы «Контроль», p≤0,05; # — достоверное отличие от группы «14-суточное АВ», p≤0,05.

тации уровень Глн в МВ I и II типа передней большеберцовой мышцы увеличился в среднем на 10 и 6%, к 7-м суткам вернулся к исходному. В МВ I и II типа камбаловидной мышцы на 3-и сутки восстановительного периода содержание данного полисахарида снизилось на 6 и 8% соответственно; на 7-е сутки в МВ I типа камбаловидной мышцы это различие составило около 4%, для II типа — уровень этого энергетического субстрата возвратился к контрольным значениям.

Внутриклеточное содержание триглицеридов в мышечных волокнах. Через 14 дней функциональной разгрузки имелось накопление ТГ в обоих типах МВ передней большеберцовой мышцы (в среднем на 12% для I типа и на 18% для II типа), отсутствие всякой динамики в МВ I типа и снижение уровня (в среднем на 9%) в МВ II типа камбаловидной мышцы в сравнении с контролем ($p \leq 0,05$). Спустя трое суток восстановления уровень ТГ в МВ передней большеберцовой мышцы по сравнению с группой контроля оказался выше на 5 и 8% соответственно для I и II типа. На 7-е сутки это различие полностью исчезло. В МВ I типа камбаловидной мышцы существенных отличий данного параметра на разных сроках послеразгрузочной реадаптации от контроля показано не было, в то время как в волокнах II типа на 3-и сутки восстановления разница в сравнении с контролем приблизилась к 4%, на 7-е сутки — нивелировалась.

Обсуждение. Таким образом, полученные данные свидетельствуют о следующем.

Во-первых, отмечается почти пропорциональное снижение как сырого, так и сухого веса обеих мышц в течение 14-дневной функциональной разгрузки путем антиортостатического вывешивания крысы и на разных сроках послеразгрузочного периода, что отражается на изменениях площади поперечного сечения волокон, измеренной на криостатных мышечных срезах. При этом к концу эксперимента полного восстановления исходного (контрольного) веса обеих мышц не наблюдалось. Площадь поперечного сечения волокон камбаловидной мышцы к седьмым суткам восстановления исходного уровня не достигла, в отличие от её мышцы-антагониста.

Во-вторых, показатели уровня энергетических внутриклеточных мышечных субстратов на протяжении всего эксперимента изменялись по-разному для каждой из мышц в отдельности. Так, например, уровень содержания гликогена в мышечных волокнах обоих типов камбаловидной мышцы к 14-м суткам антиортостатического вывешивания не отличался от контроля, после семидневного периода восстановления отметилось снижение его исключительно в мышечных волокнах I типа. В то же время какой-либо динамики содержания триглицеридов в волокнах I типа этой мышцы зафиксировано не было. Двухнедельная разгрузка привела к снижению уровня триглицеридов для волокон II типа, однако к 7-м суткам восстановления он постепенно нивелировался.

Значения внутриклеточного содержания гликогена и триглицеридов в волокнах обоих типов передней большеберцовой мышцы спустя 7 дней периода реадаптации после 14 дней функциональной разгрузки полностью приблизились к таковым, полученным в контрольной группе. Следовательно, можно заключить, что на седьмые сутки периода реадаптации наблюдается «запаздывание» процессов восстановления веса мышцы по сравнению с содержанием энергетических субстратов (триглицеридов и полисахарида гликогена).

Заключение. Результаты, полученные в ходе эксперимента, позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего использования энергетических субстратов гликогена и триглицеридов в качестве эффективных маркёров функциональной активности волокон скелетных мышц в данных условиях, что может оказаться весьма полезным для научного обоснования разработки новых методов коррекции гипокинетических синдромов.

Конфликт интересов. Настоящая работа поддержана программой фундаментальных исследований отделения физиологии и фундаментальной медицины Российской академии наук.

Библиографический список

1. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Шенкман Б.С. Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // Российский физиологический журнал имени И.М. Сеченова. 2004. Т. 90, № 5. С. 508–521.
2. Fitts R.H., Riley D.R., Widrick J.J. Microgravity and skeletal muscle // Journal of Applied Physiology. 2000. Vol. 89. P. 823–839.
3. Alford E.K., Roy R.R., Hodgson J.A., Edgerton V.R. Electromyography of rat soleus, medial gastrocnemius and tibialis anterior during hindlimb suspension // Experimental Neurology. 1987. Vol. 96. P. 635–649.
4. Comparison of soleus muscles from rats exposed to microgravity for 10 versus 14 days / R.S. Staron, W.J. Kraemer, R.S. Hikida [et al.] // Histochem. Cell Biol. 1998. Vol. 110. P. 73–80.
5. Ильина — Какуева Е.И. Особенности развития мышечной атрофии у крыс различного возраста при вывешивании // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2001. № 1. С. 28–32.
6. Wronski T., Morey-Holton E. Skeletal response to simulated weightlessness: a comparison of suspension techniques // Aviation, Space and Environmental Medicine. 1987. Vol. 58 / P. 63–68.
7. Morey-Holton E.R., Globus R.K. Hindlimb unloading rodent model: technical aspects // Journal of Applied Physiology. 2002. Vol. 92 (4). P. 1367–1377.

Translit

1. Grigor'ev A. I., Kozlovskaja I.B., Shenkman B.S. Rol' opornoj afferentacii v organizacii tonicheskoj myshechnoj sistemy // Rossijskij fiziologicheskij zhurnal imeni I.M. Sechenova. 2004. T. 90, № 5. S. 508–521.
2. Fitts R.H., Riley D.R., Widrick J.J. Microgravity and skeletal muscle // Journal of Applied Physiology. 2000. Vol. 89. R. 823–839.
3. Alford E.K., Roy R.R., Hodgson J.A., Edgerton V.R. Electromyography of rat soleus, medial gastrocnemius and tibialis anterior during hindlimb suspension // Experimental Neurology. 1987. Vol. 96. R. 635–649.
4. Comparison of soleus muscles from rats exposed to microgravity for 10 versus 14 days / R.S. Staron, W.J. Kraemer, R.S. Hikida [et al.] // Histochem. Cell Biol. 1998. Vol. 110. P. 73–80.
5. Il'ina — Kakueva E.I. Osobennosti razvitija myshechnoj atrofii u krys razlichnogo vozrasta pri vyveshivanii // Aviakosmicheskaja i jekologicheskaja medicina. 2001. № 1. C. 28–32.
6. Wronski T., Morey-Holton E. Skeletal response to simulated weightlessness: a comparison of suspension techniques // Aviation, Space and Environmental Medicine. 1987. Vol. 58 / P. 63–68.
7. Morey-Holton E.R., Globus R.K. Hindlimb unloading rodent model: technical aspects // Journal of Applied Physiology. 2002. Vol. 92 (4). P. 1367–1377.