

УДК 612.062; 612.017.2

**ВЛИЯНИЕ ОПЫТА КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЕТОВ
НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ
ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЫШЦ НОГ
ПОСЛЕ ВОЗВРАЩЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА ЗЕМЛЮ**

Т.Б. Кукоба, Д.Р. Бабич, Е.В. Фомина

Канд. пед. наук, доц. Т.Б. Кукоба (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)
Д.Р. Бабич; докт. биол. наук, проф. Е.В. Фомина
(ФГБУ ГНЦ РФ – ИМБП РАН)

В данном исследовании представлены особенности восстановления функциональных возможностей мышц ног космонавтов с учетом опыта длительных орбитальных полетов на Международную космическую станцию (МКС). Целью исследования явилось определение влияния повторного пребывания в космическом полете (КП) человека на восстановление функциональных возможностей мышц после возвращения его на Землю. В исследовании приняли участие шесть космонавтов, выполнивших по два космических полета. Проведен сравнительный анализ результатов изокINETического тестирования максимальных моментов силы и выносливости мышц нижних конечностей до и после первого и второго космических полетов. Показано, что предшествующий опыт пребывания в условиях микрогравитации оказывает положительное влияние на динамику восстановления скоростно-силовых характеристик мышц ног космонавтов после второго КП. Функциональные возможности мышц снижались меньше, и восстановление их происходило быстрее, чем после первого КП. Повторная реадaptация к условиям гравитации протекала легче, чем после первого КП. Выявлено, что скоростно-силовые характеристики мышц голени и бедра в среднем по группе были снижены на четвертые сутки после первого длительного полета и в среднем по группе не восстанавливались к пятнадцатым суткам пребывания в условиях Земли, тогда как после второго КП не выявлено значимых изменений всех изучаемых показателей, за исключением силы мышц сгибателей голени, где значимые потери по сравнению с предполетным уровнем отмечались как на четвертые, так и на пятнадцатые сутки реадaptации.

Ключевые слова: реадaptация к условиям Земли, повторные космические полеты, межпланетные пилотируемые полеты, космонавты, скоростно-силовые качества мышц

**The Influence of Space Flights Experience on the Readaptation
of the Lower Extremities Function after Returning to Earth.****T.B. Kukoba, D.R. Babich, E.V. Fomina**

This study presents the features of restoring the function of cosmonauts' leg muscles taking into account the experience of long-term orbital flights aboard the International Space Station (ISS). The study objective was to evaluate the

effect of repeated space flights on the restoration of human muscle function after returning to earth. The study involved six cosmonauts each performed two space flights. A comparative analysis of the results obtained during isokinetic tests of the maximal moments of force and an endurance of the lower extremity muscles before and after the first and the second space flights (SF) has been carried out. It is shown that a prior experience of staying in weightlessness has a positive effect on the dynamics of recovering the speed-strength characteristics of cosmonauts' leg muscles after the second SF. The muscle function decreased less and recovered faster and the repeated readaptation to the Earth's conditions was easier after the second flight than after the first one. It has been revealed that on average the speed-strength characteristics of muscles of the lower leg and of the thigh reduced on the fourth day after the first long-term flight and did not recover by the fifteenth day of stay in Earth conditions. Whereas, after the second SF no significant changes were found in all studied parameters, with the exception of leg flexor's strength, the significant losses of which were observed both on the fourth and the fifteenth days of readaptation in comparison with the preflight level.

Keywords: readaptation to the Earth's conditions, repeated space flights, interplanetary manned flights, cosmonauts, speed-strength qualities of muscles

В настоящее время важным и недостаточно изученным остается вопрос об адаптационных процессах в организме человека, неоднократно возвратившегося в условия гравитационного поля Земли после воздействия микрогравитации. Активно идет подготовка к межпланетным пилотируемым полетам, изучается влияние опыта КП на реадaptацию к условиям Земли разных систем организма человека [1–4].

На сегодняшний день известно, что НАСА, ЕКА, ДжАКСА и Китайское национальное космическое управление (CNSA) участвуют в разработке космической станции следующего поколения. Лунные миссии намечены уже на ближайшее время, они предназначены для того, чтобы служить испытательным полигоном для будущих экспедиций человека на Марс [5, 6]. Чтобы спрогнозировать, как быстро человек в условиях других планетных тел, имеющих различные уровни гравитации, например, на Луне (1/6 G) и Марсе (1/3 G) сможет выполнять профессиональные задачи, требующие проявления силы и силовой выносливости мышц, необходимо выявить, как быстро восстановятся скоростно-силовые качества после пребывания его в условиях космического полета [7]. МКС находится на низкой околоземной орбите и в определенной степени защищена воздействием магнитосферы Земли [8, 9], но предстоящие исследовательские миссии на Луну, Марс и за их пределы подвергнут членов экипажа повышенному воздействию агрессивной среды [10]. Риски для здоровья связаны с космической радиацией, ограниченным контактом с Землей и физиологическими и психологическими последствиями длительной изоляции в закрытой и враждебной экосистеме, с изменением циркадианных ритмов и т. д. [11]. При этом основным негативным фактором космического полета остается микрогравитация, которая вызывает адаптивные

перестройки всех систем организма, начиная с клеточной и молекулярной адаптации, изменения в геноме, эпигеноме, что способствует ускорению процесса старения и некоторым заболеваниям. Встретившись однажды с условиями микрогравитации, организм человека приобретает опыт формирования компенсаторных механизмов к их негативному воздействию по средствам саморегуляции физиологических функций [12]. Каждый следующий раз при встрече с микрогравитацией системы организма будут опираться на предыдущий опыт встречи со специфическими условиями, и компенсаторные механизмы будут «включаться» по уже сформированным однажды путям.

Дефицит механической нагрузки и деформирующего воздействия на опорно-двигательный аппарат (ОДА), отсутствие напряжения антигравитационных мышц приводит к снижению тонуса мышц, резкому снижению их функций и вызывает нарушение энергетического и пластического обеспечения мышечной деятельности, что обуславливает снижение работоспособности и сократительных способностей мышц [12, 13].

Цель исследования – определить влияние опыта космических полетов на восстановление функциональных возможностей мышц после возвращения на Землю.

В исследовании приняли участие шесть космонавтов, выполнивших по два полета длительностью от 115 до 202 суток. Средний возраст космонавтов к началу первого КП составлял $41,6 \pm 3,0$ года. Второй КП у испытуемых состоялся примерно через 4 года, возраст космонавтов на тот период достигал в среднем $45,6 \pm 3,0$ года.

Оценка скоростно-силовых качеств мышц осуществлялась по результатам изокинетического тестирования (силовой динамометр Cybex) на основе регистрации моментов силы мышц ног космонавтов. Тестирование проводили за 30 и 60 суток до космического полета и на 4-е и 15-е сутки после его завершения. При оценке изменений скоростно-силовых показателей за исходный уровень брали среднее значение двух тестов, выполненных до космического полета.

Оценивали максимальную произвольную силу мышц голени на угловой скорости $30^\circ/\text{с}$, мышц бедра на угловой скорости $60^\circ/\text{с}$, силовую выносливость мышц бедра на угловой скорости $120^\circ/\text{с}$ при выполнении 22 сгибаний и разгибаний ног в коленном суставе.

Оценка достоверности различий между результатами, полученными после первого и второго полетов, осуществлялась на основе применения непараметрических методов описательной статистики в программе Statistica 10 с использованием критерия Вилкоксона при сравнении показателей внутри группы до и после каждого полета отдельно и критерия Манна – Уитни – при сравнении данных после двух различных полетов.

Исследование одобрено Биоэтической комиссией ГНЦ РФ – ИМБП РАН и Многосторонним наблюдательным советом по исследованиям в области человека (Human Research Multilateral Review Board – HRMRB).

Все космонавты, принимавшие участие в исследовании, использовали в обоих полетах тренировки на силовом тренажере ARED по схеме российской системы профилактики негативных влияний невесомости [14]. В обоих КП космонавты использовали аналогичные параметры нагрузки в силовой тренировке. Вес отягощения в упражнениях для мышц ног в среднем по группе составлял от 90 % до 140 % от веса тела космонавта на Земле.

Результаты изокINETического тестирования показали, что статистически значимое снижение ($P \leq 0,05$) силы мышц как на четвертые, так и на пятнадцатые сутки реадaptации после первого и второго полетов выявлено в среднем по группе только в мышцах разгибателей голени. Потери на четвертые сутки реадaptации по сравнению с исходным уровнем после первого КП в среднем по группе составляли $15,5 \% \pm 4,1 \%$ ($P = 0,03$), после второго КП были незначительно меньше и составляли $13,2 \% \pm 5,0 \%$ ($P = 0,05$). На пятнадцатые сутки реадaptации сила продолжала снижаться в среднем по группе как после первого, так и после второго КП, после первого КП потери составляли $20,3 \% \pm 7,4 \%$ ($P = 0,03$), после второго КП – $16,6 \% \pm 9,1 \%$ ($P = 0,04$) (рис. 1).

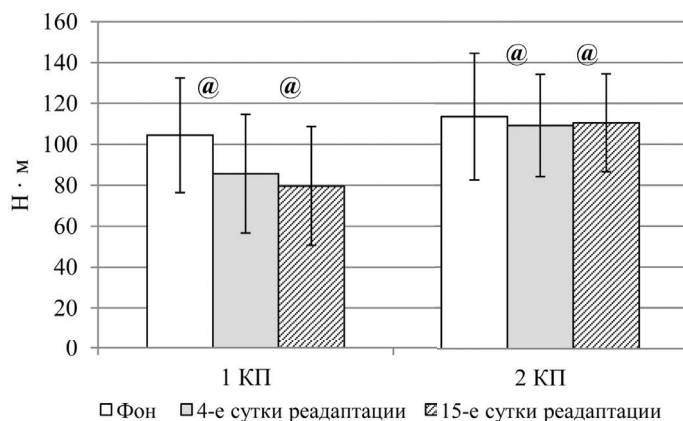


Рис. 1. Изменение силы мышц разгибателей голени космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P \leq 0,05$

Сила мышц сгибателей голени значительно снизилась на четвертые сутки ($P = 0,03$) после первого КП и в среднем продолжала уменьшаться к пятнадцатым суткам реадaptации ($P = 0,03$), достигая достоверно значимых различий с потерями после второго КП ($P = 0,04$). Потери после первого КП на четвертые сутки реадaptации составили $17,4 \% \pm 4,2 \%$, на пятнадцатые – $23,0 \% \pm 10,3 \%$ от исходного уровня (рис. 2). Потери силы мышц сгибателей голени на четвертые сутки после второго КП были незначительны, составили $4,0 \% \pm 2,1 \%$ и оставались на том же уровне на пятнадцатые сутки реадaptации.

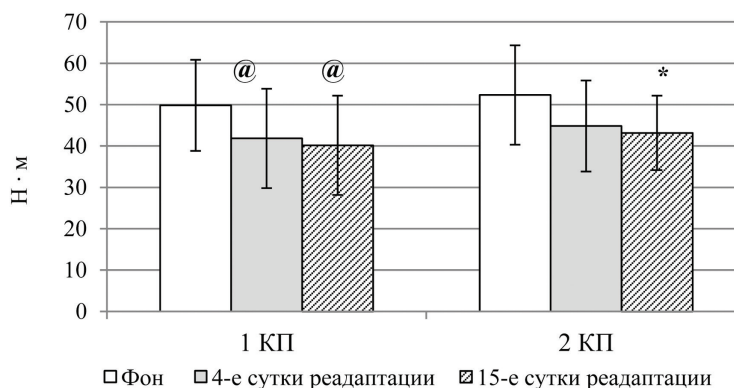


Рис. 2. Изменение силы мышц сгибателей голени космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P < 0,05$; * – различия достоверны с группой 1 КП при $P < 0,05$

Сила мышц разгибателей бедра значительно снизилась после первого КП на четвертые сутки реадaptации ($P = 0,03$) и в среднем продолжала уменьшаться к пятнадцатым суткам ($P = 0,03$), достигая достоверно значимых различий с данными после второго КП ($P = 0,05$). Потери силы после первого КП на четвертые сутки составили $13,9 \% \pm 8,1 \%$, на пятнадцатые сутки реадaptации – $18,1 \% \pm 10,3 \%$ в сравнении с исходным уровнем (рис. 3). Сила мышц разгибателей бедра на четвертые сутки реадaptации после второго КП в среднем практически не изменялась на пятнадцатые сутки реадaptации, потери составили $8,6 \% \pm 5,1 \%$.

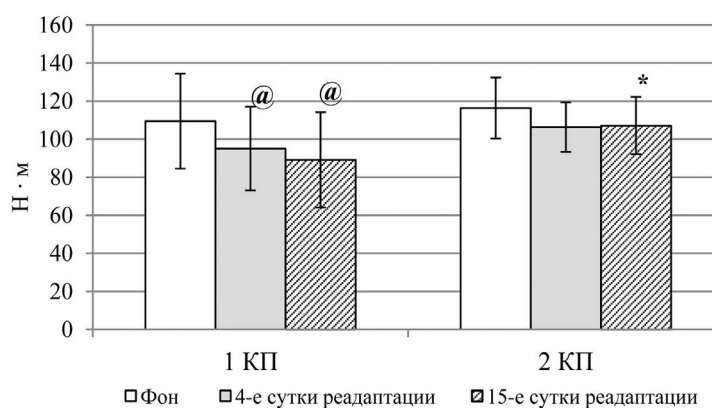


Рис. 3. Изменение силы мышц разгибателей бедра космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P < 0,05$; * – различия достоверны с группой 1 КП при $P \leq 0,05$

Сила мышц сгибателей бедра значительно снизилась после первого КП на четвертые сутки реадaptации ($P = 0,03$), на пятнадцатые сутки сила в среднем по группе продолжала снижаться, достигая достоверно значимых различий со значениями на четвертые сутки ($P = 0,03$) и с данными после второго КП ($P = 0,03$). Потери силы составили на четвертые сутки $19,1 \% \pm 7,0 \%$, на пятнадцатые сутки реадaptации потери достигали $32,1 \% \pm 15,5 \%$. Сила мышц разгибателей бедра на четвертые сутки реадaptации после второго КП в среднем снижалась незначительно, потери составляли $8,4 \% \pm 2,6 \%$, на пятнадцатые сутки реадaptации потери составили $7,8 \% \pm 3,2 \%$ (рис. 4).

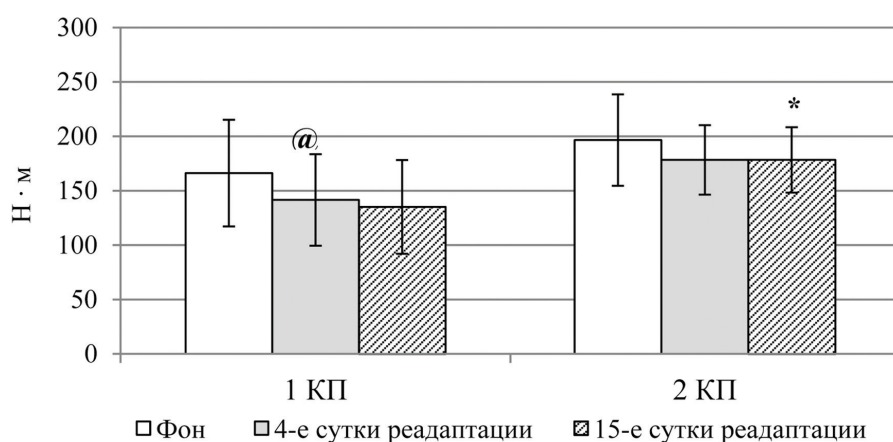


Рис. 4. Изменение силы мышц сгибателей бедра космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P < 0,05$; * – различия достоверны с группой 1 КП при $P < 0,05$

Достоверно значимые различия между данными двух КП выявлены в силовой выносливости мышц разгибателей бедра как на четвертые ($P = 0,03$), так и на пятнадцатые ($P = 0,03$) сутки реадaptации (рис. 5). После первого КП на четвертые сутки реадaptации потери силовой выносливости были больше, чем после второго КП, достоверно отличаясь от исходного уровня ($P = 0,03$), и составляли $12,8 \% \pm 4,8 \%$. На пятнадцатые сутки потери практически не изменялись и составляли $14,0 \% \pm 7,3 \%$. После второго полета снижение силовой выносливости мышц разгибателей бедра значимо не отличалось от исходного уровня ни на четвертые, ни на пятнадцатые сутки реадaptации, потери составили $5,0 \% \pm 2,1 \%$ и $6,9 \% \pm 3,7 \%$ соответственно.

Силовая выносливость мышц сгибателей бедра (рис. 6) значительно снижалась у космонавтов после первого КП как на четвертые ($P = 0,03$), так и на пятнадцатые сутки реадaptации ($P = 0,03$), потери на четвертые сутки после КП в сравнении с исходным уровнем составляли $15,6 \% \pm 7,8 \%$, на пятнадцатые сутки – $11,2 \% \pm 6,1 \%$. После второго КП потери были меньше

и на четвертые сутки реадaptации составляли $5,5\% \pm 3,1\%$, на пятнадцатые сутки силовая выносливость в среднем увеличивалась, практически достигнув исходного уровня, значительно отличаясь от данных после первого КП ($P = 0,03$).

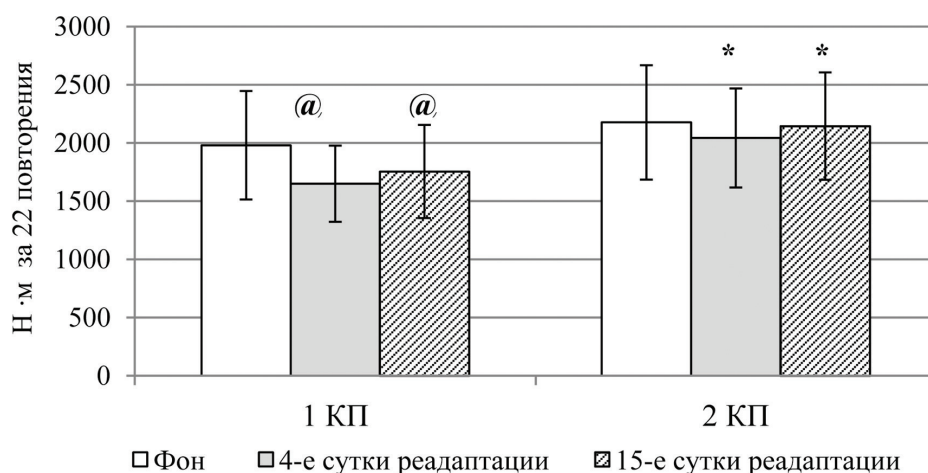


Рис. 5. Изменение силовой выносливости мышц разгибателей бедра космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P < 0,05$; * – различия достоверны с группой 1 КП при $P < 0,05$

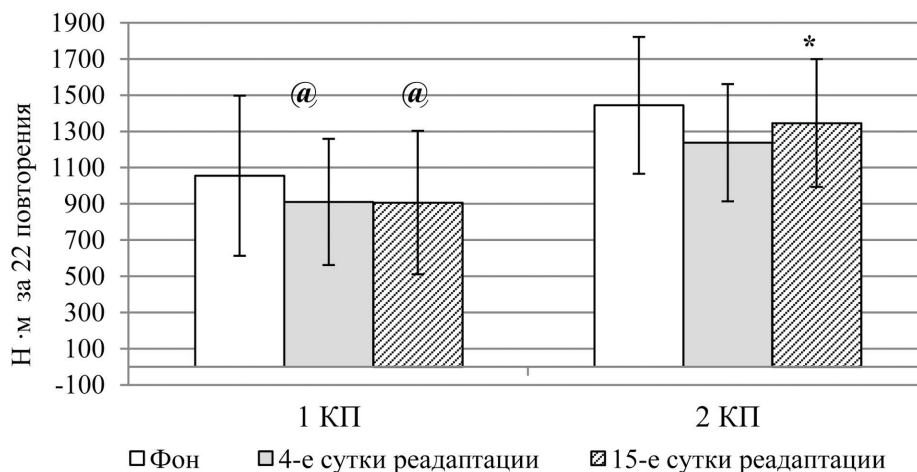


Рис. 6. Изменение силовой выносливости мышц сгибателей бедра космонавтов после первого (1 КП) и второго (2 КП) космических полетов

Примечание: @ – различия достоверны с фоном при $P < 0,05$; * – различия достоверны с группой 1 КП при $P < 0,05$

Таким образом, наиболее выраженные негативные изменения функциональных возможностей мышц в период реадaptации отмечены в отношении силы мышц после первого КП, наибольшее снижение к пятнадцатым суткам после полета выявлены в мышцах сгибателях бедра. Силовая выносливость после первого КП к пятнадцатым суткам реадaptации практически не изменилась в мышцах разгибателях бедра, а в мышцах сгибателях наблюдалась тенденция к увеличению показателя.

Положительная динамика восстановления функциональных возможностей мышц выявлена после второго КП в отношении силовой выносливости и силы мышц сгибателей бедра. Достоверно значимые потери силы и тенденция к снижению от четвертых к пятнадцатым суткам реадaptации выявлены только в мышцах сгибателях голени. Остальные показатели не изменились от четвертых к пятнадцатым суткам после второго КП.

Исследование показало, что даже однократный опыт пребывания в условиях невесомости положительно сказался на динамике реадaptации к условиям Земли скоростно-силовых качеств мышц ног космонавтов. Успешное выполнение напланетной деятельности в сверхдальних космических полетах будет во многом определяться способностью членов экипажа к выполнению работ, сопряженных с проявлением силовых способностей [15]. В связи с этим очевидна целесообразность использования МКС в качестве модельной базы для оценки изменений силы и силовой выносливости после выполнения космических миссий [16], в том числе повторных. Полученные данные о том, что реадaptация мышечной системы к условиям гравитации после повторных полетов менее выражена, чем после первого полета, согласуются с данными об изменениях вестибулярного аппарата. Опросы космонавтов, проводимые после космических полетов, показали, что при повторных космических полетах адаптация в полете и последующая реадaptация проходили субъективно легче. Так же имеются сведения, что повторное пребывание в длительном космическом полете приводит к резкому, статистически значимому сокращению периода реадaptации вестибулярной функции [17]. Кроме того, показано, что у большинства космонавтов, впервые находившихся в длительном космическом полете, происходит достоверное ухудшение показателей зрительного слежения вплоть до девяти суток после полета. У космонавтов, имевших предварительный опыт пребывания в условиях микрогравитации, период ухудшения данного показателя снижается до двух суток после полета. При послеполетной реадaptации развивается новая стратегия зрительного слежения, характерная только для космонавтов, впервые находившихся в условиях микрогравитации [18].

В исследовании E. Hallgren et al. в 2016 г. с участием астронавтов, имеющих опыт космических полетов, и космонавтов, выполнивших один полет, было показано, что при сравнении дополетного и послеполетного окулярного контроллинга отолит-управляемым отражением (OCR) обнаружено статистически значимое снижение реакции OCR при возвращении к земным усло-

виям у космонавтов, имевших опыт КП. Так же отмечена тенденция к различию в OCR между двумя группами астронавтов: группой, имевшей опыт полетов, и группой, не имевшей опыта полетов [19].

В другом исследовании, с учетом полетов на орбитальной станции «Мир» (для многих космонавтов экспедиции на МКС были повторными, иногда троекратными), было установлено, что соотношение потерь минеральной плотности кости в разных сегментах скелета имеет индивидуально специфическую стабильность независимо от типа орбитальной станции. При остеоденситометрии космонавтов после повторных полетов выявлено, что соотношение потерь минеральной плотности кости в разных участках скелета сохраняет индивидуально специфическую стабильность независимо от типа орбитальной станции и условий полета [1], что указывает на индивидуальную адаптацию костной системы к условиям микрогравитации и, как следствие, индивидуальную реадaptацию систем организма человека к условиям Земли. Кроме того, чем длительнее срок пребывания в измененных условиях, тем труднее и дольше происходит реадaptация к обычным условиям жизни [20]. Адаптивные значительные перестройки в нервно-мышечной системе, произошедшие за шесть месяцев пребывания в условиях микрогравитации, не могут быть возвращены к исходному уровню за короткий промежуток времени после завершения космического полета. Динамика силы и силовой выносливости мышц человека в период до пятнадцати суток реадaptации к условиям Земли, показанная в настоящей работе, находится в полном соответствии с представлениями о механизмах развития гипогравитационного двигательного синдрома, указывая на достаточно медленное восстановление скоростно-силовых возможностей мышц. Вероятно, устранение нарушений, обусловленных длительным пребыванием в невесомости как на уровне клеточных и молекулярных механизмов центрального управления движением, так и на уровне исполнительного аппарата самой мышцы, требует большего времени. Кроме того, возвращение в условия земной гравитации сопряжено с наличием дополнительных эксцентрических нагрузок [15, 16], что может задерживать процесс восстановления.

Таким образом, опыт пребывания в условиях микрогравитации оказал положительное влияние на динамику восстановления скоростно-силовых характеристик мышц ног космонавтов, после второго КП функциональные возможности мышц снижались меньше, и восстановление их происходило быстрее, чем после первого КП. Повторная реадaptация к условиям гравитации протекала легче, чем после первого КП. В ходе эксперимента выявлены следующие особенности: потери силовой выносливости и силы мышц ног космонавтов на четвертые сутки реадaptации были меньше по сравнению с фоновыми данными после второго полета; восстановление скоростно-силовых характеристик мышц проходило быстрее после второго полета; достоверно значимые отличия между данными, полученными после первого

и второго КП, отмечались в силе мышц разгибателей бедра космонавтов на пятнадцатые сутки реадaptации.

Минимизировать снижение скоростно-силовых качеств мышц ног космонавтов за время длительного ПК, на наш взгляд, представляется возможным, если у российских членов экипажей появится возможность выполнять силовые тренировки на отечественном многофункциональном силовом тренажере, поскольку он будет обеспечивать помимо изокинетического еще и изотонический режим мышечного сокращения при выполнении упражнений. Кроме этого в программу тренировочного процесса планируется ввести тестирование силовых качеств мышц на данном тренажере, что позволит вносить своевременную целенаправленную коррекцию в силовые тренировки космонавтов на протяжении полетного макроцикла.

Результаты исследования можно применять в процессе послеполетной физической реабилитации космонавтов в острый период реадaptации космонавтов.

Выводы

1. Опыт пребывания космонавтов в условиях микрогравитации положительно сказался на динамике восстановления силы и силовой выносливости мышц ног.

2. Потери силовой выносливости и силы мышц ног космонавтов на четвертые сутки реадaptации были меньше после второго полета.

3. Восстановление скоростно-силовых характеристик мышц проходило быстрее после второго полета, чем после первого, к пятнадцатым суткам реадaptации выявлены достоверно значимые отличия в силе мышц разгибателей бедра космонавтов.

Работа поддержана базовым финансированием РАН 63.1.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- [1] Comparative Analysis of Changes in the Skeleton of Cosmonauts in Long-Term Orbital Flights and the Possibilities of Prediction for Interplanetary Missions / V.S. Oganov, V.S. Bogomolov, A.V. Bakulin [et al.] // Human Physiology. – 2010. – Vol. 36. – No 3. – P. 282–289.
- [2] Visual – Manual Tracking After Long Spaceflights / L.N. Kornilova, D.O. Glukhikh, E.V. Habarova [et al.] // Human Physiology. – 2016. – Vol. 42. – No 3. – P. 301–311.
- [3] Vestibular Function After Repeated Space Flights / I.A. Naumov, L.N. Kornilova, D.O. Glukhikh [et al.] // Human Physiology. – 2017. – Vol. 43. – No 7. – P. 757–764.
- [4] Fomina, E.V. Recovery of Muscle Strength After Long and Super-Long Space Flights / E.V. Fomina, T.B. Kukoba // Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC. – 2020. – P. 865–867.
- [5] NASA's Journey to Mars: Pioneering Next Steps in Space Exploration // National Aeronautics and Space Administration. Published October 2015 by U.S.: NP-2015-08-2018-HQ.

- [6] A Brief History of Spaceflight from 1961 to 2020: An Analysis of Missions and Astronaut Demographics / Michael G. Smith [et al.] // *Acta Astronautica*. October 2020. – Vol. 175. – P. 290–299. DOI:10.1016/j.actaastro.2020.06.004.
- [7] Prediction of Lunar-and Martian-Based Intra-and Site-to-Site Task Performance / Ade C.J. [et al.] // *Aerospace Medicine and Human Performance*. April 2016. – Vol. 87. – No 4. – P. 367–374. DOI: 10.3357/AMHP.4399.2016.
- [8] Hassler, Donald M [et al.]. Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science (New York, N.Y.)*, 9 Dec 2013. – Vol. 343. Issue 6169. DOI: 10.1126/science.1244797.
- [9] Apollo Lunar Astronauts Show Higher Cardiovascular Disease Mortality: Possible Deep Space Radiation Effects on the Vascular Endothelium / M.D. Delp, J.M. Charvat, C. Limoli [et al.] // *Sci Rep* 6, 29901 (2016). DOI: 10.1038/srep29901.
- [10] Chancellor, J.C. Space Radiation: The Number One Risk to Astronaut Health beyond Low Earth Orbit / J.C. Chancellor, G.B. Scott, J.P. Sutton // *Life (Basel)*. – 2014. – No 4(3). – P. 491–510.
- [11] Fundamental Biological Features of Spaceflight: Advancing the Field to Enable Deep-Space Exploration / Afshinnekoo Ebrahim [et al.] // *Cell*. – 2021, November 25. – Vol. 183. – Issue 5. – P. 1162–1184. DOI: 10.1016/j.cell.2020.10.050.
- [12] Human Pathophysiological Adaptations to the Space Environment / Gian C. Demontis [et al.] // *Frontiers in physiology*. – 2017, Aug 2. – No 8. – P. 547. DOI: 10.3389/fphys.2017.00547.
- [13] Shenkman, B.S. Gravity Mechanisms in Tonic Motor System. Neurophysiological and Muscle Aspects / B.S. Shenkman, A.I. Grigoriev, I.B. Kozlovskaya // *Human Physiology*. – 2017. – No 43. – P. 578–590. DOI: 10.1134/S0362119717050140.
- [14] Козловская, И.Б. Российская система профилактики: настоящее и будущее = Russian System of Countermeasures: the Present and Future, Aerospace and Ecological Medicine / И.Б. Козловская, Е.Н. Ярманова, Е.В. Фомина // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2013. – Т. 47. – № 1. – С. 13–20.
- [15] Prediction of Planetary Mission Task Performance for Long-Duration Spaceflight / S.L. Sutterfield [et al.] // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2019, Aug. – Vol. 51. – Issue 8. – P. 1662–1670. DOI: 10.1249/MSS.0000000000001980.
- [16] Muscle Volume, Strength, Endurance, and Exercise Loads During 6-Month Missions in / R. Gopalakrishnan, K.O. Genc [et al.] // *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. – 2010. – Vol. 81. – No 2. – P. 91–104.
- [17] Vestibular Function After Repeated Space Flights / I.A. Naumov, I.A. Kornilova, D.O. Glukhikh [et al.] // *Human Physiology*. – 2017. – Vol. 43. – No 7. – P. 757–764. DOI: 10.1134/S036211971707012X.
- [18] The Effect of Afferentation of Various Sensory Systems on the Otolith-Ocular Reflex in a Real And Simulated Weightlessness / I.A. Naumov, L.N. Kornilova, D.O. Glukhikh [et al.] // *Human Physiology*. – 2021. – Vol. 47. – No 1. – P. 70–78. DOI: 10.1134/S0362119720060080.
- [19] Decreased Otolith-Mediated Vestibular Response in 25 Astronauts Induced by Long-Duration Spaceflight / E. Hallgren, L. Kornilova, E. Fransen [et al.] // *J. Neurophysiol.* – 2016. – Vol. 115. – No 6. – P. 3045–3051.
- [20] Теория адаптации-реадаптации в современных представлениях «здоровье» = The Theory of Adaptation-Readaptation in Modern Concepts of “Health” / С.Н. Шилов, И.А. Игнатова, Т.А. Муллер [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 1–6. – С. 1275–1280.