

УДК 612.7

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНУСА МЫШЦ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОМИОСТИМУЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ 5-СУТОЧНОЙ ОПОРНОЙ РАЗГРУЗКИ

© 2020 г. Л. Е. Амирова^{1,*}, Н. Ю. Осецкий¹, Н. В. Шишкин¹, И. И. Пономарев¹,
И. В. Рукавишников¹, **И. Б. Козловская¹**, Е. С. Томиловская^{1,**}

¹ФГБУН ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*E-mail: lyubove.dmitrieva@gmail.com

**E-mail: finegold@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

После доработки 08.03.2020 г.

Принята к публикации 20.03.2020 г.

Метод электромиостимуляции (ЭМС) многообразен в своем проявлении — от используемой частоты и амплитуды стимуляции до места ее применения — и широко распространен в медицине и спорте. Одним из подходов к оценке эффективности этого метода является исследование мышечного тонуса, т.к. известно, что хроническая электрическая стимуляция напрямую влияет на характеристики мышцы, изменяя ее силу, выносливость, размер волокна и окислительные возможности. В данном исследовании сравнивали влияние ежедневной низко- (25 Гц) и высокочастотной (50 Гц) ЭМС в условиях 5-суточной “сухой” иммерсии (СИ) в двух независимых группах испытуемых с группой без применения стимуляции. К окончанию иммерсии в контрольной группе наблюдалась тенденция к снижению мышечного тонуса в камбаловидной, икроножной и передней большеберцовой мышцах. Низкочастотная (НЧ) стимуляция была более эффективной в сохранении мышечного тонуса камбаловидной мышцы, в то время как высокочастотное (ВЧ) воздействие было более эффективным для икроножной мышцы. Ни НЧ, ни ВЧ стимуляция не предотвращали снижения тонуса передней большеберцовой мышцы голени, хотя, сразу же после завершения иммерсии в группах со стимуляцией ее тонус был достоверно выше исходных значений, в отличие от контрольной группы. Применение ежедневных сессий ЭМС на фоне 5-суточной опорной разгрузки избирательно препятствует снижению тонуса мышц голени. НЧ ЭМС наиболее предпочтительна для мышц с преимущественным содержанием медленных волокон, а ВЧ — быстрых.

Ключевые слова: опорная разгрузка, низкочастотная электромиостимуляция, высокочастотная электромиостимуляция, мышечный тонус, “сухая” иммерсия.

DOI: 10.31857/S0131164620040025

Наряду с другими средствами реабилитации и тренировки в спорте [1, 2], клинической [3, 4] и космической медицине [5–7], важное место занимают методы электромиостимуляции (ЭМС), разработка и исследование которых проводятся в различных лабораториях по всему миру. Выбор режимов и протоколов ЭМС в целях поддержания различных свойств скелетных мышц должен учитывать особенности тканевой организации скелетной мышцы млекопитающих.

Скелетные мышцы человека образованы волокнами двух типов — “медленными” и “быстрыми”, отличающимися по функциональным свойствам. Число и соотношение типов волокон в различных мышцах не одинаково. Мышцы, преимущественно состоящие из “медленных” во-

локон, характеризуются высокой выносливостью и большой продолжительностью сокращения, однако, в то же время, невысокой максимальной силой и скоростью сокращения. Мышцы с большим содержанием “быстрых” волокон, напротив, обладают высокой скоростью и силой сокращения, но характеризуются быстрой утомляемостью. В последние десятилетия стало известно, что все эти свойства определяются преобладанием той или иной изоформы тяжелых цепей миозина, т.е. миозиновым фенотипом. Экспрессия специфических изоформ миозина определяется подконтрольностью “быстрому” или “медленному” типу мотонейронов [8]. По мнению ряда авторов, контроль мотонейрона над фенотипом волокна осуществляется через устойчивый характер

импульсации. Так, частота импульсации “медленных” мотонейронов составляет 10–15 Гц, “быстрых” – 40–50 Гц [9, 10]. Именно этот факт и позволил предположить, что частота импульсации и соответственно паттерн сократительной активности мышечных волокон определяет их миозиновый фенотип и другие свойства [11]. Это предположение послужило толчком к развитию экспериментальных моделей ВЧ (выше 50 Гц) и НЧ (5–25 Гц) ЭМС мышц, которые затем послужили основой для разработки соответствующих тренировочных и реабилитационных средств и методов [12].

Особое внимание стоит уделить рассмотрению ЭМС в медицине, где метод имеет большие перспективы. К примеру, применение ЭМС у пациентов с хронической сердечной недостаточностью имеет жизненно важное значение, так как физическая активность при данной патологии либо противопоказана, либо затруднена из-за их общего состояния. Таким пациентам, как правило, назначают НЧ низкоинтенсивную стимуляцию мышечной ткани в хроническом режиме с целью подготовки к кардиомиопластической операции и в качестве реабилитации после нее. Показано, что курс ЭМС улучшает показатели выживаемости, уровень и качество жизни и сокращает время реабилитации [13].

Интересно отметить, что авторы исследований в большой массе отдают предпочтение в изучении НЧ ЭМС, оставляя без внимания стимуляцию ВЧ, что имеет под собой некоторые основания: ВЧ ЭМС более болезненна и быстрее вызывает утомление. Одним из методических подходов к проведению ВЧ ЭМС являются так называемые “русские токи”, разработанные группой Я.М. Коца для тренировки мышечной силы [14]. Суть этого вида стимуляции заключается в том, что благодаря параметрам импульсов, вызываемые ею сокращения мышц максимально близки к физиологическим, уменьшая, таким образом, дискомфорт и быструю утомляемость стимулируемого.

Несмотря на то, что ЭМС не является редким методом, применяемые протоколы сильно разнятся по частоте и амплитуде тока, а также по продолжительности процедуры и курса стимуляции [13, 15–17]. Поэтому, данных сравнительных исследований эффектов применения ВЧ и НЧ ЭМС для поддержания и тренировки мышечных свойств в литературе крайне мало [18].

В данном исследовании мы сравниваем профилактическое влияние НЧ и ВЧ ЭМС в условиях искусственного декондиционирования мышечной системы у здоровых добровольцев. Оптимальным протоколом по обратимому декондиционированию мышечной системы человека является классическая модель микрогравитации – “сухая” иммерсия (СИ) [19, 20], выгодно отличающаяся от

других подобных моделей достижением глубокого эффекта в короткие сроки [21–24]. Исследование в моделях имеет ряд преимуществ, таких как постоянный контроль и одинаковые условия эксперимента для всех участников. Данная работа сосредоточена на изучении мышц голени, так как известно, что они наиболее подвержены негативным эффектами двигательной и опорной разгрузки [7].

Единого подхода к оценке эффективности ЭМС в настоящее время не существует. В клинической практике при работе с пожилыми и/или ослабленными пациентами часто используют двигательные тесты и опросники качества жизни [13]. В данной работе такой подход был бы неэффективен, и в качестве более точного количественного метода оценки эффективности ЭМС была выбрана миотонометрия [25], которая регистрирует поперечный мышечный тонус и позволяет неинвазивно исследовать свойства всего миофасциального комплекса.

Для сравнительного анализа были выбраны три мышцы голени: камбаловидная, икроножная и передняя большеберцовая. Камбаловидная мышца голени, расположенная на задней поверхности, являясь позно-тонической, состоит преимущественно из медленных волокон [26]. Регистрацию тонуса проводили на ее латеральной части, непокрытой сухожилием. Две головки икроножной мышцы расположены поверх камбаловидной. В отличие от камбаловидной мышцы, икроножная отвечает за быстрые движения и наполовину состоит из быстрых волокон [27]. Передняя большеберцовая мышца активна при отрывании стопы от земли и при наступании на пятку при ходьбе и состоит преимущественно из быстрых волокон [28]. Она антагонистична камбаловидной мышце и вместе с ней регулирует угол в голеностопном суставе, что важно для поддержания равновесия [29, 30].

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 34 мужчины-добровольца без выявленных неврологических заболеваний и нарушений функции опорно-двигательного аппарата. Сравнительные данные по трем группам – контрольной, НЧ и ВЧ ЭМС – приведены в табл. 1.

Модельные условия. Для моделирования опорной разгрузки применяли горизонтальную “сухую” иммерсию [31] – погружение в ванну, наполненную термонейтральной (31–32°C) водой и покрытую водонепроницаемой пленкой большой площади (рис. 1, А). Процедура проведения СИ была стандартной [20] и одинаковой во всех трех группах. Длительность воздействия составляла 5 сут, на протяжении которых испытуемые находились

Таблица 1. Сравнительные данные трех групп по антропометрическим параметрам

Параметры	Контрольная группа	НЧ ЭМС группа	ВЧ ЭМС группа	Тест Брауна-Форсайта
Количество, чел.	18	10	6	—
Возраст, лет	29.5 ± 1.7	30.9 ± 2.0	35.5 ± 1.7	$p = 0.1137$
Рост, м	1.77 ± 0.01	1.75 ± 0.014	1.72 ± 0.028	$p = 0.2591$
Вес, кг	69.9 ± 1.8	76.0 ± 1.7	73.3 ± 3.3	$p = 0.1167$
Индекс массы тела, $\text{кг}/\text{м}^2$	22.4 ± 0.5	$25.0 \pm 0.6^*$	$24.8 \pm 0.6^*$	$p = 0.0025^*$

Примечание: данные представлены в виде средних по группе (*Mean*) $\pm$ ошибка среднего (*SEM*), * — $p < 0.05$ по сравнению с группой “контроль”.

в иммерсионной ванне за исключением гигиенических процедур, некоторых исследований и манипуляций. В период восстановления после завершения иммерсии испытуемые поддерживали низкий уровень физической активности: запрещалось проводить какие-либо тренировки. Испытуемым рекомендовали больше сидеть или лежать.

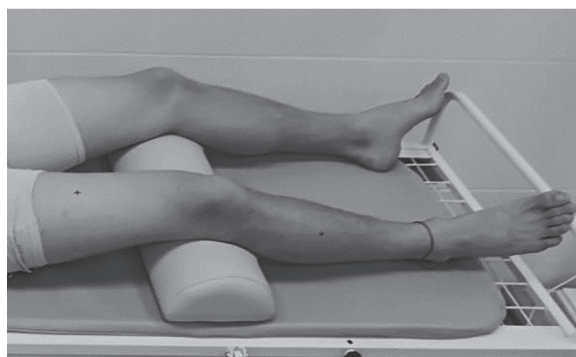
Электромиостимуляция. ЭМС подвергали мышцы нижних конечностей. После подготовки ко-

жи, два слегка увлажненных многоразовых электрода из электропроводящего силикона накладывали на проксимальную и дистальную части бедра и голени (передняя и задняя поверхности). Электроды устанавливали таким образом, чтобы они полностью пересекали поперек параллельный ход всех мышечных волокон стимулируемых мышц (рис. 2, А). Такое наложение электродов вызывало генерализованное сокращение и мышечных мишеней (камбаловидной, икроножной и перед-

А



Б



В

**Рис. 1.** Условия эксперимента.

А — общий вид иммерсионной ванны с испытуемым. Положение ног испытуемого при регистрации мышечного тонуса лежа на спине (Б) и на животе (В).



Рис. 2. Испытуемый с наложенными электродами для ВЧ ЭМС в иммерсионной ванне (А) и при стимуляции на кушетке (Б).
Наложение электродов при НЧ ЭМС было аналогичным.

ней большеберцовой мышц голени), и мышц, лежащих глубже. Амплитуду стимуляции подбирали индивидуально, основываясь на максимально переносимой испытуемым силе стимуляции.

Для осуществления НЧ стимуляции использовали двухполярные симметричные прямоугольные электрические импульсы длительностью 1 мс, частотой 25 Гц и амплитудой от 3.9 до 52.3 мА. ЭМС выполняли с использованием двух автономных электростимуляторов, соединенных между собой кабелем синхронизации, что обеспечивало одновременное сокращение всех мышц конечностей и, таким образом, предотвращало нежелательные движения конечностей. Процедуру проводили на протяжении 4-х ч каждый день иммерсии без выемки испытуемого из иммерсионной ванны. Каждый час проводили корректировку амплитуды стимуляции и, если требова-

лось, увеличивали (или снижали) ее по просьбе испытуемых.

ВЧ ЭМС осуществляли путем подачи прямоугольных ритмических импульсов с частотой 50 Гц; при этом каждый импульс, длительность которого составлял 10 мс, был “заполнен” несущей звуковой частотой 2500 Гц. Амплитуда стимуляции составляла от 4.3 до 19.0 В. Процедуру также проводили ежедневно на протяжении 20 мин, но для соблюдения техники безопасности стимуляцию проводили вне иммерсионной ванны, на полусдутом надувном матрасе для сохранения условий безопасности (рис. 2, Б).

Параметры стимуляции приведены в сравнительной табл. 2. В контрольной группе испытуемые не применяли каких-либо профилактических мер.

Исследуемые параметры. Тонус камбаловидной, икроножной и передней большеберцовой

Таблица 2. Сравнительные характеристики протоколов электромиостимуляции (ЭМС) в двух группах

Параметры	НЧ ЭМС	ВЧ ЭМС
Амплитуда (средняя по группе)	Бедро 18.4 ± 7.8 мА Голень 14.6 ± 6.5 мА	Бедро 18.6 ± 3.3 В Голень 9.7 ± 6.2 В
Частота	25 Гц	50 Гц
Длительность импульса	1 мс	10 мс
Длительность процедуры/ суммарное чистое время стимуляции	240/80 мин	20/3.3 мин
Стимулируемые группы мышц	Одновременно передняя и задняя поверхности бедра и голени обеих ног. 1 с стимуляции, 2 с отдыха	Одновременно передние и задние поверхности бедра (10 с стимуляции, 50 с отдыха), затем передние и задние поверхности голени (10 с стимуляции, 50 с отдыха) обеих ног
Прибор	“Стимул-01 НЧ”, (СКТБ Биофизприбор, Россия)	“Амплидин-ЭСТ” (ООО КБ “Диполь”, Россия)

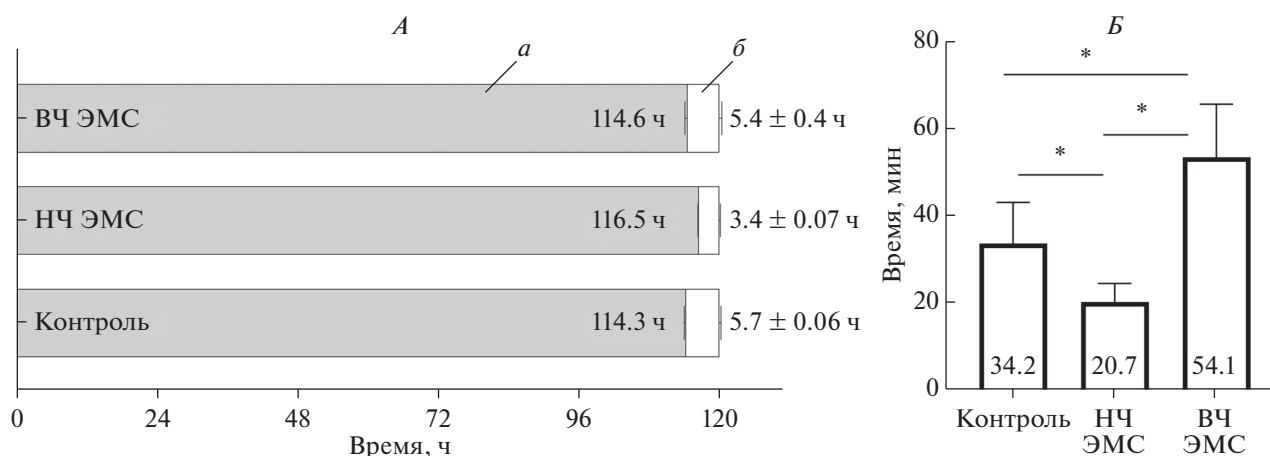


Рис. 3. Среднее время в иммерсионной ванне за 5 сут исследования (А) и среднее ежесуточное время вне ванны (Б). А — по оси абсцисс: время в часах, по оси ординат: контрольная группа, группа с НЧ ЭМС и группа с ВЧ ЭМС. а — время в иммерсионной ванне, б — время вне иммерсионной ванны. Б — по оси абсцисс: контрольная группа, группа с НЧ ЭМС и группа с ВЧ ЭМС. По оси ординат: время в минутах. В столбцах указано среднее время по группе. Данные представлены в виде среднего по группе ± стандартное отклонение, * — $p < 0.05$ по сравнению между группами.

мышц голени оценивали миотонометром *Myoton-Pro* (*Myoton AS*, Эстония) по частоте вибрации мышцы, выраженной в Гц, в ответ на короткий механический импульс (15 мс) стабильной силы (0.4 Н). Чем выше частота вибрации ткани, тем выше ее тонус [25]. Используя понятие “тонус”, подразумевается общее напряжение мышечного комплекса, включающее в себя жесткостные и вязкоупругие свойства мышечных клеток и прочих структурных элементов [32], а также собственное напряжение мышцы вследствие электрической импульсации.

Регистрацию тонуса проводили в середине дня в положении лежа два-три раза в фоновый период до начала иммерсии, на 2-е и 5-е сут СИ, а также в день окончания погружения, после выхода испытуемых из ванны и на вторые сутки периода восстановления. Под коленный сустав в положении лежа на спине и под голеностопный сустав в положении лежа на животе подкладывали валики для придания комфортной и стандартной позиции (рис. 1, Б). Во время иммерсии замеры проводили без выемки испытуемого из ванны и без использования валиков. В ходе исследования испытуемых просили максимально расслабить мышцы.

Статистика. Для сравнения групп применяли статистический тест Брауна-Форсайта (программа *GraphPad Prism 8.3.0*), с поправкой на неравный размер выборок Геймса-Ховелла. Сравнения между группами по времени вне ванны проводили с помощью однофакторного дисперсионного анализа, с поправкой Бонферрони на малые выборки. Для сравнения тонуса мышц голени между группами и в различные дни исследо-

вания применяли двухфакторный дисперсионный анализ (время в иммерсии × три группы).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Суммарное время, проведенное вне иммерсионной ванны за 5 сут, в трех группах составляло от 3.4 до 5.7 ч (рис. 3, А). Все группы достоверно отличались друг от друга по этому показателю (рис. 3, Б).

Изменение тонуса мышц голени в условиях 5-суточной опорной разгрузки. Исходные значения тонуса камбаловидной мышцы статистически не отличались друг от друга. В латеральной головке икроножной мышцы фоновые значения тонуса составили 15.8 ± 1.6 Гц в контрольной группе и 15.0 ± 1.3 Гц — в группе с ВЧ ЭМС. Исходные значения тонуса этой мышцы в группе с НЧ ЭМС, однако, были достоверно выше, составляя — 18.3 ± 1.5 Гц (табл. 3). Тонус передней большеберцовой мышцы был наиболее высоким из исследуемых мышц во всех группах, что вероятно обусловлено ее анатомическими особенностями — тонкая веретенообразная мышца, расположенная близко к кости. Ее тонус в контрольной группе до иммерсии составлял 21.6 ± 3.0 , 22.0 ± 1.9 Гц — в группе с НЧ ЭМС и 20.4 ± 1.7 Гц — с ВЧ (табл. 3).

Иммерсионное воздействие влияло на показатели мышечного тонуса. Так, тонус камбаловидной мышцы в контрольной группе прогрессивно снижался к 5-м сут иммерсионного воздействия в среднем на 6% (рис. 4). Аналогичная тенденция наблюдалась в группе с ВЧ ЭМС. В группе НЧ ЭМС, напротив, первоначальное снижение тонуса камбаловидной мышцы на 2-е сут СИ (–4.5%) становилось менее выраженным к 5-м сут иммер-

Таблица 3. Тонус мышц голени в фоновом исследовании и в период восстановления

Мышцы и группы	Фон		После 0 сут		После 2 сут	
	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>
Камбаловидная м.						
Контроль	17.52	1.94	16.80	1.80	16.30	2.00
НЧ ЭМС	17.91	2.19	18.70	2.80	18.10	0.90
ВЧ ЭМС	16.85	1.54	17.51	1.88	17.23	1.79
Икроножная м.						
Контроль	15.78	1.62	15.10	1.80	15.00	1.80
НЧ ЭМС	18.29 [#]	1.48	17.90 [#]	1.80	16.60	1.20
ВЧ ЭМС	15.05	1.29	15.23	1.58	14.91	2.22
Передняя большеберцовая м.						
Контроль	21.63	3.03	18.37*	2.2	18.40*	1.58
НЧ ЭМС	21.99	1.89	23.30 [#]	2.1	23.30	1.20
ВЧ ЭМС	20.45	1.68	23.00 [#]	2.7	21.14	2.53

Примечание: данные представлены в виде средних по группе (*Mean*) ± стандартное отклонение (*SD*), * – $p < 0.05$ по сравнению с фоновыми значениями; [#] – $p < 0.05$ по сравнению с группой “Контроль”.

сии (–2.9%), а у некоторых испытуемых отмечалось даже увеличение тонуса (рис. 4, А).

Тонус латеральной головки икроножной мышцы в контрольной группе прогрессивно снижался, достигая 4-процентного уменьшения к концу иммерсии. В группе ВЧ ЭМС на 2-е сут СИ тонус также проявлял тенденцию к снижению, однако на 5-е сут он возрастал, превышая фоновые значения (рис. 4, Б). В группе с НЧ ЭМС отмечалось резкое и достоверное падение тонуса на протяжении всей иммерсии, что может быть связано с высокими исходными значениями в этой группе.

В контрольной группе и группе с НЧ ЭМС наблюдалось достоверное снижение тонуса передней большеберцовой мышцы на 2-е и 5-е сут СИ. Однако в группе с применением ВЧ ЭМС, это снижение было более чем в два раза менее выраженным, чем в двух других группах (рис. 4, В).

Таким образом, ежедневное применение ЭМС приводило к избирательному сохранению мышечного тонуса (или даже небольшому его увеличению) в условиях 5-суточной опорной разгрузки. Так, НЧ ЭМС была эффективной в сохранении мышечного тонуса камбаловидной мышцы, в то время как высокочастотное воздействие было более эффективным для икроножной и передней большеберцовой мышц голени.

Изменение тонуса мышц голени в период восстановления после 5-суточной “сухой” иммерсии. В контрольной группе в день завершения СИ и на вторые сутки периода восстановления во всех исследуемых мышцах значения тонуса были ниже фоновых (табл. 3). В группах НЧ и ВЧ ЭМС, в камбаловидной мышце голени, напротив, после 5-суточной СИ наблюдалась тенденция к увели-

чению тонуса. В икроножной мышце в группах со стимуляцией в период восстановления тонус был ниже фоновых значений. В передней большеберцовой мышце голени после завершения СИ в группах НЧ и ВЧ ЭМС регистрировалось увеличение тонуса, статистически значимое по сравнению с контрольной группой ($p < 0.05$).

Таким образом, применение как ВЧ, так и НЧ ЭМС приводило к более быстрому восстановлению тонуса камбаловидной и передней большеберцовой мышц.

Полученные результаты согласуются с литературными источниками, указывающими на избирательную эффективность различных протоколов ЭМС для мышц с различным соотношением быстрых и медленных волокон [33–35]. Камбаловидная мышца голени содержит большее число медленных волокон, по сравнению с икроножной и передней большеберцовой мышцами, что делает, по-видимому, данную мышцу восприимчивее к низкой частоте стимуляции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты нашего исследования показывают, что применение ежедневных сессий ЭМС может способствовать сохранению тонуса мышц голени во время 5-суточной опорной разгрузки. Оптимальная частота ЭМС зависит от вида стимулируемой группы мышц: для поздней мускулатуры с преобладанием медленных волокон наибольший эффект оказывает НЧ (25 Гц) ЭМС [36]. Для мышц с большим содержанием быстрых волокон наиболее результативным будет применение ЭМС с высокой частотой (50 Гц) [36].

Стоит отметить, что обе группы были неоднородны по амплитуде стимуляции. Так, в группе с НЧ ЭМС условно можно выделить три подгруппы по интенсивности используемой ЭМС (рис. 5, *А* и *Б*, отмечены разными оттенками серого). Группа ВЧ ЭМС также была более однородной, за исключением одного испытуемого, который переносил достаточно высокую амплитуду при стимуляции бедра (рис. 5, *В* и *Г*). Однако, так как подгруппы очень маленькие (по 3–4 чел.), можно считать, нецелесообразным изучать корреляции между амплитудой стимуляции и изменениями мышечного тонуса, хотя это представляет интерес для будущих исследований.

Вместе с профилактическим эффектом ЭМС в группе ВЧ ЭМС на состояние тонуса мышц нижних конечностей могло оказать влияние увеличенное время пребывания вне иммерсионной ванны во время стимуляции. Для минимизации времени вне ванны коллективом исследователей была четко отработана процедура стимуляции, и подготовительная часть осуществлялась без выемки испытуемого из ванны. Также, во время стимуляции испытуемый лежал на полусдутым надувном матрасе, воспроизводившем, таким образом, неустойчивую опору. Стоит отметить, что, несмотря на то, что в контрольной группе и группе НЧ ЭМС не проводилось аналогичных периодов вне иммерсии на надувном матрасе, однако протоколы исследований в этом случае сопровождались короткими периодами (до 40 мин) извлечения испытуемых из иммерсионной ванны для проведения методик и медицинских манипуляций. Несмотря на то, что группы достоверно отличались по времени, проведенному вне ванны, можно полагать, что роль данного фактора в изменениях тонуса не так значительна, так как в целом среднее время нахождения вне иммерсии не превышало 60 мин (рис. 3, *Б*).

Значения мышечного тонуса отличались большой индивидуальной вариативностью, а также, по имеющимся данным, они очень чувствительны к изменению твердости опоры во время измерения. Именно с этими двумя факторами следует связывать изначально высокий тонус в группе с применением НЧ ЭМС, что отразилось на достаточно сильном снижении тонуса икроножной мышцы на вторые сутки СИ. Также, индекс массы тела испытуемых в этой группе был достоверно выше, чем в контрольной группе, а мускулатура была более развита. Если сравнивать изменение тонуса икроножной мышцы внутри иммерсии, то к пятым суткам отмечалась тенденция к его увеличению, что может свидетельствовать о профилактическом влиянии НЧ стимуляции.

Достаточно сильное снижение тонуса, зарегистрированное в переднеберцовой мышце, вероятнее всего, обуславливаются ее анатомическим

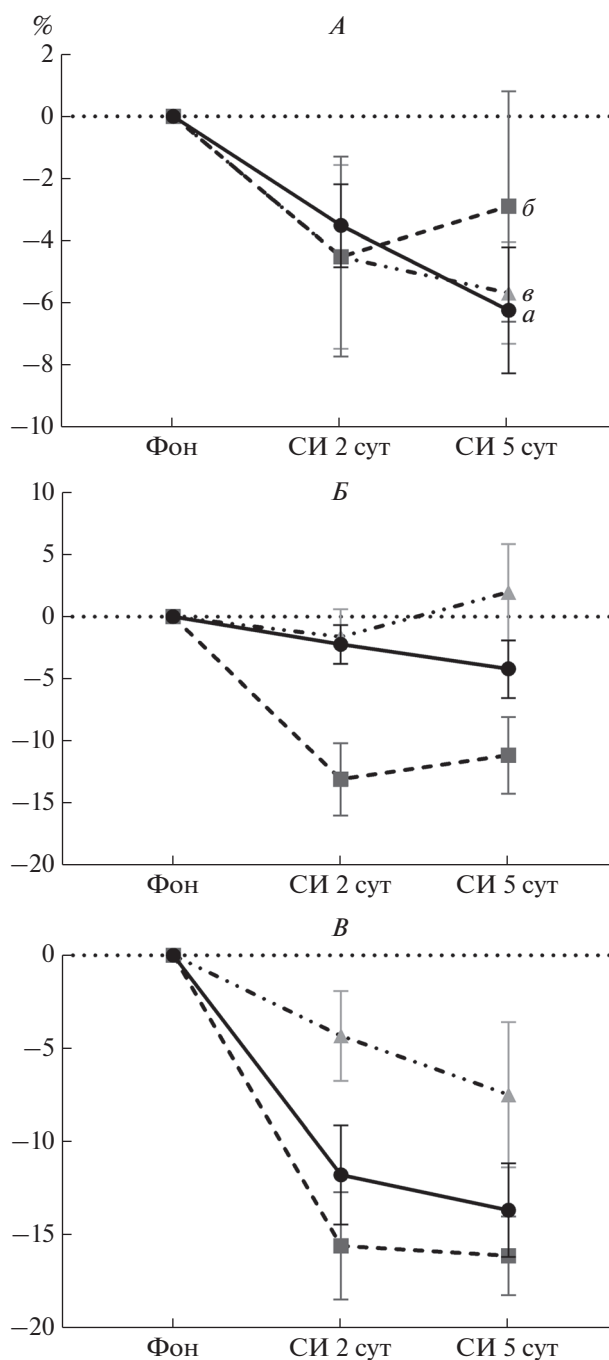


Рис. 4. Изменение тонуса камбаловидной (*А*), икроножной (*Б*) и передней большеберцовой (*В*) мышц голени на вторые и пятые сутки иммерсионного погружения относительно исходных значений. По оси абсцисс: фон — исходные значения мышечного тонуса, СИ 2 сут и СИ 5 сут — вторые и пятые сутки воздействия иммерсии. По оси ординат: изменение тонуса относительно исходных значений в процентах. *а* — группа “Контроль”, *б* — группа с НЧ ЭМС, *в* — группа с ВЧ ЭМС. Данные представлены в виде средних значений $\pm$ ошибка среднего, * — $p < 0.05$ по сравнению с фоновыми значениями.

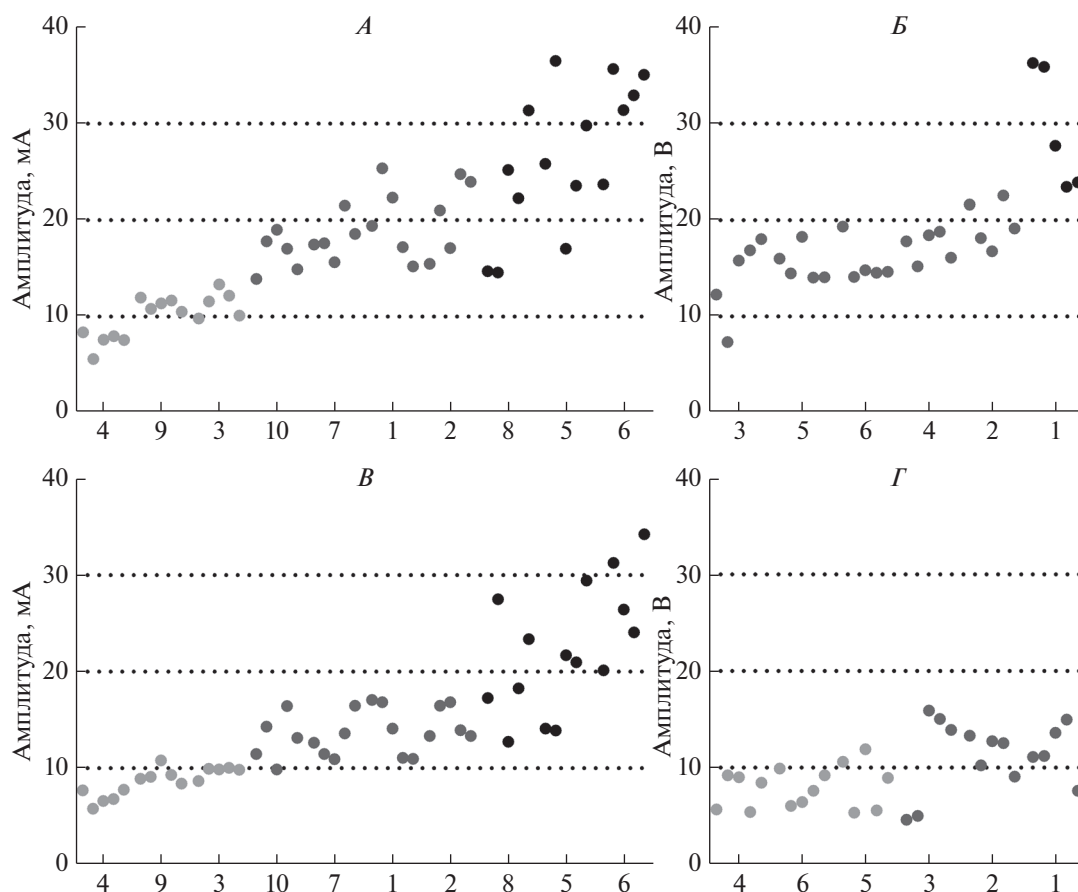


Рис. 5. Распределение амплитуды стимуляции в группах с НЧ (бедро — А, голень — В) и ВЧ (бедро — Б, голень — Г) ЭМС.

По оси абсцисс: испытуемые. Значками обозначена средняя амплитуда для каждого дня иммерсии. Разные испытуемые обозначены разными значками. По оси ординат: амплитуда в миллиамперах (мА) — для группы НЧ ЭМС и в вольтах (В) — для группы ВЧ ЭМС.

строением. Интересно отметить, что сразу же после завершения СИ тонус мышцы был значительно выше исходных значений, чего не наблюдалось в контрольной группе. Известно, что по данным литературы показано, что высокая частота (50–80 Гц) стимуляции может приводить к гипертрофии мышечных волокон гораздо чаще, чем низкочастотная (8–20 Гц) [37]. Как правило, гипертрофия мышечных волокон наблюдалась в случаях, когда применяли, как и в нашем исследовании, максимально переносимую амплитуду стимуляции. К сожалению, мы не оценивали гипертрофию мышечных волокон на прямую, но об этом может свидетельствовать увеличенный тонус передней большеберцовой мышцы в период восстановления. Также, возможно, что тонус может зависеть от положения тела и при регистрации в иммерсии может быть ниже, чем на кушетке.

Логично будет отметить, ЭМС влияет не только на тонус, но и на мышечную силу и объем мышцы, которые положительно коррелируют между собой [38, 39], однако это не означает ли-

нейную зависимость. Например, существуют убедительные доказательства того, что ЭМС может приводить к значительному росту силы без каких-либо изменений в размерах мышц [8], что свидетельствует о существенном вкладе нейромоторных механизмов в прирост силы. В частности, одним из возможных механизмов, влияющих на тренировочный эффект ЭМС, может быть увеличение возбудимости нейронов спинного мозга [40].

Важно отметить, что ЭМС не может рассматриваться как полноценная альтернатива физическим тренировкам [41], и, в ряде исследований показано, что сочетанное применение физических упражнений вместе с ЭМС гораздо более эффективно по многим показателям [42]. В то же время, в целом ряде случаев — при невозможности выполнения физических упражнений вследствие условий ограниченной двигательной активности (космический полет, изоляция в гермообъектах) или различных заболеваниях (хроническая сердечная недостаточность, последствия различных травм, инсультов и т.д.) — может служить

средством поддержания достаточного уровня тренированности мышц [43–48].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение ежедневных сессий ЭМС на фоне 5-суточной опорной разгрузки может препятствовать снижению тонуса мышц голени. НЧ ЭМС при этом наиболее эффективна в поддержании тонических свойств постуральных мышц (состоящих, преимущественно из медленных волокон), а ВЧ — для фазных (состоящих, преимущественно из быстрых волокон). Для клинической практики можно рекомендовать сочетанное применение как ВЧ, так и НЧ ЭМС, таким образом, увеличив диапазон воздействия.

Этические нормы. Проводимые исследования были одобрены биоэтической комиссией Института медико-биологических проблем РАН (Москва), (протоколы № 370 от 15.09.2014, № 401 от 15.07.2015, № 432 от 14.09.2016 и № 465 от 25.12.2017) и полностью соответствовали принципам Хельсинкской декларации 1964 г.

Информированное согласие. Каждый участник исследования добровольно, после разъяснения ему потенциальных рисков, преимуществ и характера предстоящего исследования, подписал информированное согласие.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (RFMEFI61317X0074).

Благодарности. Коллектив авторов искренне благодарит доктора биологических наук, Юрия Андреевича Коряка за его терпеливые и скрупулезные разъяснения тонкостей методики электромиостимуляции, бережливо собранные за многолетнюю работу в ИМБП и переданные молодому поколению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Верхошанский Ю.В.* Основы специальной силовой подготовки в спорте. М.: Физкультура и спорт, 1977. 215 с.
2. *Filipovic A., DeMarees M., Grau M. et al.* Superimposed Whole-Body Electrostimulation Augments Strength Adaptations and Type II Myofiber Growth in Soccer Players During a Competitive Season // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 1187.
3. *Edwards T., Motl R.W., Pilutti L.A.* Cardiorespiratory demand of acute voluntary cycling with functional electrical stimulation in individuals with multiple sclerosis with severe mobility impairment // *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 2018. V. 43. № 1. P. 71.
4. *Silantyeva E., Zarkovic D., Astafeva E. et al.* Comparative Study on the Effects of High-Intensity Focused Electromagnetic Technology and Electrostimulation for the Treatment of Pelvic Floor Muscles and Urinary Incontinence in Parous Women: Analysis of Posttreatment Data // *Female Pelvic Med. Reconstr. Surg.* 2019. <https://doi.org/10.1097/SPV.0000000000000807>
5. *Cherepakhin M.A., Kakurin L.I., Il'ina-Kakueva E.I., Fedorenko G.T.* Evaluation of the effectiveness of electrostimulation of the muscles in preventing disorders related to prolonged limited motor activity in man // *Kosm. Biol. Aviakosm. Med.* 1977. V. 11. № 2. P. 64.
6. *Коряк Ю.А.* Электромиостимуляционная тренировка в условиях космического полета и ее влияние на функцию и архитектуру мышц / Материалы всероссийской научно-практической конференции по вопросам спортивной науки в детско-юношеском спорте и спорте высших достижений. 30 ноября–2 декабря. Сборник материалов конференции. Москва, 2016. С. 759.
7. *Maffiuletti N.A., Green D.A., Vaz M.A., Dirks M.L.* Neuromuscular Electrical Stimulation as a Potential Countermeasure for Skeletal Muscle Atrophy and Weakness During Human Spaceflight // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 1031.
8. *Шенкман Б.С., Козловская И.Б.* Физиологические основы низкочастотной электростимуляции мышц, перспективного средства профилактики саркопении и гипогравитационной атрофии // *Авиакосм. и экологич. мед.* 2019. Т. 53. № 2. С. 21.
9. *Schiaffino S., Reggiani C.* Fiber Types in Mammalian Skeletal Muscles // *Physiol. Rev.* 2011. V. 91. № 4. P. 1447.
10. *Shenkman B.S.* From Slow to Fast: Hypogravity-Induced Remodeling of Muscle Fiber Myosin Phenotype // *Acta Naturae.* 2016. V. 8. № 4(31). P. 47.
11. *Pette D., Vrbová G.* The Contribution of Neuromuscular Stimulation in Elucidating Muscle Plasticity Revisited // *Eur. J. Transl. Myol.* 2017. V. 27. № 1. P. 33.
12. *Yarmanova E.N., Kozlovskaya I.B., Khimoroda N.N., Fomina E.V.* Evolution of russian microgravity countermeasures // *Aerosp. Med. Hum. Perform.* 2015. V. 86. № 12 Suppl. P. A32.
13. *Полтавская М.Г., Свириденко В.П., Козловская И.Б. и др.* Сравнение эффективности нейромышечной электростимуляции и интервальных физических тренировок в ранней реабилитации пациентов, госпитализированных с декомпенсацией хронической сердечной недостаточности // *Физиология человека.* 2018. Т. 44. № 6. С. 67.
14. *Полтавская М.Г., Свириденко В.П., Козловская И.Б. et al.* Comparison of the Efficacy of Neuromuscular Electrostimulation and Interval Exercise Training in Early Rehabilitation of Patients Hospitalized with De-compensation of Chronic Heart Failure // *Human Physiology.* 2018. V. 44. № 6. P. 663.
15. *Коц Я.М., Хвилон В.А.* Тренировка мышечной силы методом электростимуляции. Сообщение II // *Теория и практика физической культуры.* 1971. № 4. С. 66.
16. *Сумин А.Н.* Локальные физические тренировки с применением электростимуляции скелетных мышц у больных ХСН // *Журн. серд. недост.* 2009. Т. 10. № 1. С. 37.
17. *Sillen M.J.H., Speksnijder C.M., Eterman R.A. et al.* Effects of neuromuscular electrical stimulation of muscles of ambulation in patients with chronic heart failure or

- COPD: a systematic review of the English-language literature // *Chest*. 2009. V. 136. № 1. P. 44.
17. *Arena R., Pinkstaff S., Wheeler E. et al.* Neuromuscular Electrical Stimulation and Inspiratory Muscle Training as Potential Adjunctive Rehabilitation Options for Patients with Heart Failure // *J. Cardiopulm. Rehabil. Prev.* 2010. V. 30. № 4. P. 209.
 18. *Ward A.R., Shkuratova N.* Russian electrical stimulation: the early experiments // *Physical Therapy*. 2002. V. 82. № 10. P. 1019.
 19. *Kozlovskaya I.B.* Fundamental and applied objectives of investigations in immersion // *Aviakosm. Ekol. Med.* 2008. V. 42. № 5. P. 3.
 20. *Tomilovskaya E., Shigueva T., Sayenko D. et al.* Dry Immersion as a Ground-Based Model of Microgravity Physiological Effects // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 284.
 21. *Kozlovskaya I.B., Sayenko I.V., Miller T.F. et al.* Erratum to: New Approaches to Countermeasures of The Negative Effects of Micro-Gravity in Long-Term Space Flights // *Acta Astronautica*. 2007. V. 60. № 8–9. P. 783.
 22. *Ogneva I.V.* Transversal stiffness of fibers and desmin content in leg muscles of rats under gravitational unloading of various durations // *J. Appl. Physiol.* (1985). 2010. V. 109. № 6. P. 1702.
 23. *Navasolava N.M., Custaud M.A., Tomilovskaya E.S. et al.* Long-term dry immersion: review and prospects // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. № 7. P. 1235.
 24. *Рукавишников И.В., Амирова Л.Е., Кукоба Т.Б. и др.* Влияние гравитационной разгрузки на тонус мышц спины // *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 3. С. 64.
Rukavishnikov I.V., Amirova L.E., Kukoba T.B. et al. Effects of Gravitational Unloading on Back Muscles Tone // *Human Physiology*. 2017. V. 43. № 3. P. 291.
 25. *Schneider S., Peipsi A., Stokes M. et al.* Feasibility of monitoring muscle health in microgravity environments using Myoton technology // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2015. V. 53. № 1. P. 57.
 26. *Shenkman B.S., Kozlovskaya I.B.* Cellular Responses of Human Postural Muscle to Dry Immersion // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 187.
 27. *Edgerton V.R., Smith J.L., Simpson D.R.* Muscle fibre type populations of human leg muscles // *J. Histochem.* 1975. V. 7. № 3. P. 259.
 28. *Tasić D., Dimov D., Gligorijević J. et al.* Muscle Fibre Types and Fibre Morphometry in The Tibialis Posterior and Anterior of The Rat: a Comparative Study // *FactaUniversitatis Series: Medicine and Biology*. 2003. V. 10. № 1. P. 16.
 29. *Strøm M., Thorborg K., Bandholm T. et al.* Ankle Joint Control During Single-Legged Balance Using Common Balance Training Devices – Implications for Rehabilitation Strategies // *Int. J. Sports Phys. Ther.* 2016. V. 11. № 3. P. 388.
 30. *Maharaj J.N., Cresswell A.G., Lichtwark G.A.* Tibialis anterior tendinous tissue plays a key role in energy absorption during human walking // *J. Exp. Biol.* 2019. V. 222. P. jeb191247.
 31. *Шульженко Е.Б., Виль-Вильямс И.Ф.* Имитация детренированности организма методом “сухого” погружения / X чтения К.Э. Циолковского, 1975, секц. Пробл. косм. мед. биол. С. 39.
 32. *Шенкман Б.С., Григорьев А.И., Козловская И.Б.* Гравитационные механизмы в тонической двигательной системе. Нейрофизиологические и мышечные аспекты // *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 5. С. 104.
Shenkman B.S., Grigoriev A.I., Kozlovskaya I.B. Gravity Mechanisms in Tonic Motor System. Neurophysiological and Muscle Aspects // *Human Physiology*. 2017. V. 43. № 5. P. 578.
 33. *Kwong W.H., Vrbová G.* Effects of low-frequency electrical stimulation on fast and slow muscles of the rat // *Pflugers Arch.* 1981. V. 391. № 3. P. 200.
 34. *Hudlicka O., Tyler K.R.* The effect of long-term high-frequency stimulation on capillary density and fibre types in rabbit fast muscles // *J. Physiol.* 1984. V. 353. P. 435.
 35. *Vromans M., Faghri P.* Electrical Stimulation Frequency and Skeletal Muscle Characteristics: Effects on Force and Fatigue // *Eur. J. Transl. Myol.* 2017. V. 27. № 4. P. 6816.
 36. *Шенкман Б.С.* От медленных к быстрым. Гипогравитационная перестройка миозинового фенотипа мышечных волокон // *Acta Naturae*. 2016. Т. 8. № 4(31). С. 52.
 37. *Sillen M.J., Franssen F.M., Gosker H.R. et al.* Metabolic and structural changes in lower-limb skeletal muscle following neuromuscular electrical stimulation: a systematic review // *PLoS One*. 2013. V. 8. № 9. P. e69391.
 38. *Muraki S., Fukumoto K., Fukuda O.* Prediction of the muscle strength by the muscle thickness and hardness using ultrasound muscle hardness meter // *Springerplus*. 2013. V. 2. P. 457.
 39. *Hayashida I., Tanimoto Y., Takahashi Y. et al.* Correlation between Muscle Strength and Muscle Mass, and Their Association with Walking Speed, in Community-Dwelling Elderly Japanese Individuals // *PLoSOne*. 2014. V. 9. № 11. P. e111810.
 40. *Hortobagyi T., Maffiuletti N.A.* Neural adaptations to electrical stimulation strength training // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. № 10. P. 2439.
 41. *Bax L., Staes F., Verhagen A.* Does neuromuscular electrical stimulation strengthen the quadriceps femoris? A systematic review of randomised controlled trials // *Sports Med.* 2005. V. 35. № 3. P. 191.
 42. *Adams V.* Electromyostimulation to fight atrophy and to build muscle: facts and numbers // *J. Cachexia Sarcopenia Muscle*. 2018. V. 9. № 4. P. 631.
 43. *Gondin J., Cozzone P.J., Bendahan D.* Is high-frequency neuromuscular electrical stimulation a suitable tool for muscle performance improvement in both healthy humans and athletes? // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. № 10. P. 2473.
 44. *Veldman M.P., Gondin J., Place N., Maffiuletti N.A.* Effects of neuromuscular electrical stimulation training on endurance performance // *Front. Physiol.* 2016. V. 7. P. 544.
 45. *Dirks M.L., Wall B.T., Snijders T. et al.* Neuromuscular electrical stimulation prevents muscle disuse atrophy

- during leg immobilization in humans // *Acta Physiol.* 2014. V. 210. № 3. P. 628.
46. Jones S., Man W.D., Gao W. *et al.* Neuromuscular electrical stimulation for muscle weakness in adults with advanced disease // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2016. V. 10. № 6. P. CD009419.
47. Spector P., Laufer Y., Elboim-Gabyzon M. *et al.* Neuromuscular electrical stimulation therapy to restore quadriceps muscle function in patients after orthopaedic surgery: a novel structured approach // *J. Bone. Joint Surg. Am.* 2016. V. 98. № 23. P. 2017.
48. Maffiuletti N.A., Gondin J., Place N. *et al.* Clinical use of neuromuscular electrical stimulation for neuromuscular rehabilitation: what are we overlooking? // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2018. V. 99. № 4. P. 806.

Comparative Study of Low Limbs Muscles Tone Under Conductions 5-day Support Withdrawal Coupled with Different Regimens of Electromyostimulation

L. E. Amirova^{a, *}, N. Yu. Osetskiy^a, N. V. Shishkin^a, I. I. Ponomarev^a, I. V. Rukavishnikov^a,
I. B. Kozlovskaya^a, E. S. Tomilovskaya^{a, **}

^a*Institute of Biomedical Problems of the RAS, Moscow, Russia*

^{*}*E-mail: lyubove.dmitrieva@gmail.com*

^{**}*E-mail: finegold@yandex.ru*

The method of electromyostimulation is diverse in its manifestation and is widespread in medicine and sports. One of the approaches to assessing the effectiveness of this method is a muscle tone study, because it is known that chronic electrical stimulation directly affects the characteristics of the muscle, changing its strength, endurance, fiber volume and oxidative capabilities. In our study, we compared the effects of daily low- (25 Hz) and high-frequency (50 Hz) electromyostimulation with a control group under the conditions of 5-day Dry Immersion in three independent groups of subjects. There was a tendency to decrease muscle tone in the m. soleus, m. gastrocnemius, and m. tibialis anterior by the end of immersion in the control group. Low-frequency stimulation was more effective in preserving the muscle tone of the soleus muscle, while high-frequency stimulation was more effective for the gastrocnemius muscle. Neither low-frequency nor high-frequency stimulations prevented a tendency to decrease the tone of the tibialis anterior muscle, although its tone was significantly higher than the initial values compare to the control group immediately after end of immersion. The use of daily sessions of electromyostimulation during 5-day support unloading selectively prevents a decrease in the tone of the leg muscles. Low-frequency electromyostimulation is most preferred for muscles with a predominant content of slow fibers, and high-frequency — with fast.

Keywords: support unloading, low-frequency electromyostimulation, high-frequency electromyostimulation, muscle tone, Dry Immersion.