

На правах рукописи

РОЩИНА ЛЮДМИЛА ВАСИЛЬЕВНА

**ВЛИЯНИЕ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ  
СПИННОГО МОЗГА НА ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ  
МОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА**

03.03.01 - Физиология

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта» (ФГБОУ ВО «ВЛГАФК»)

**Научный руководитель:** доктор биологических наук, доцент  
**Челноков Андрей Алексеевич**

**Официальные оппоненты:** доктор биологических наук, доцент,  
заведующий лабораторией отдела сенсомоторной физиологии и профилактики Федерального государственного бюджетного учреждения науки государственного научного центра Российской Федерации Институт медико-биологических проблем Российской Академии Наук  
**Фомина Елена Валентиновна**

доктор биологических наук, профессор,  
и.о. заведующего кафедрой физиологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодёжи и туризма (ГЦОЛИФК)»  
**Мельников Андрей Александрович**

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет» (ФГБОУ ВО «УлГУ»)

Защита диссертации состоится «18» ноября 2021 года в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д.001.008.01 при ФГБНУ «НИИНФ им. П.К. Анохина» по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нормальной физиологии имени П.К. Анохина» и на сайте <http://nphys.ru/>.  
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 125315, г. Москва, ул. Балтийская, д. 8.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета,  
доктор медицинских наук



Абрамова А.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Моторная система имеет существенное значение в регуляции целенаправленной двигательной активности человека, обеспечивающей адаптацию организма к различным условиям жизнедеятельности на всех этапах возрастного развития (M.L. Foss, S.J. Keteyian, 2008; Д.А. Фарбер, М.М. Безруких, 2009; А.В. Самсонова, 2011; В.Д. Сонькин, Р.В. Тамбовцева, 2011; А.А. Челноков, 2014). К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал о роли различных структурных уровней моторной системы в управлении произвольными движениями (Я.М. Коц, 1975; В.С. Гурфинкель, Ю.С. Левик, 1985; Ю.П. Герасименко, 2000; Д. Николлс и др., 2008; К.Б. Шаповалова, 2015; U.S. Hofstoetter et al., 2015; S.M. Danner et al., 2016). Во многих трудах приведены сведения об изменении параметров, отражающих состояние коркового, спинального и периферического уровней моторной системы под влиянием мышечной работы разной направленности (Е.Б. Сологуб, 1981; Р.Н. Фомин, М.В. Селяев, 2011; Е.Ю. Андриянова, О.В. Ланская, 2014; Г.И. Попов и др., 2015; Е.В. Фомина и др., 2021; А.А. Мельников и др., 2021). Значительная часть исследований направлена на разработку нетрадиционных методов целенаправленного изменения состояния и свойств моторной системы человека (И.В. Сысоева, 2006; И.П. Ратов и др., 2007; О.Л. Виноградова и др., 2014; А.Г. Беляев, 2015; С.А. Фёдоров и др., 2017; Ю.А. Коряк, 2017). В других публикациях развернуто описываются методики электростимуляции скелетных мышц в покое и при выполнении мышечной деятельности для повышения двигательных способностей человека (Я.М. Коц, 1971; Г.Ф. Колесников, 1977; А.А. Николаев, 1999; J. Gondin et al., 2005; А.А. Грушин, В.Л. Ростовцев, 2015; Ю.А. Коряк, 2017).

Перспективными методами выявления нейрофизиологических механизмов регуляции локомоторных движений являются электромагнитная и электрическая стимуляция спинного мозга (В.С. Гурфинкель и др., 1998; Е.А. Михайлова, 2011; K. Minassian et al., 2007; P.A. Guertin, 2013; Y. Gerasimenko et al., 2010, 2015; P.M. Городничев и др., 2012; И.Н. Богачева и др., 2017; М.В. Балыкин и др., 2017; Д.А. Гладченко, 2018; D.G. Sayenko et al., 2019; Р.Н. Якупов и др., 2021; С.С. Ананьев и др., 2021). С помощью данных неинвазивных методов возможно вызывать произвольные локомоторные

движения у здоровых и с двигательными нарушениями людей. Как выяснилось, неинвазивная электромагнитная и электрическая стимуляция в проекции поясничного утолщения спинного мозга инициируют работу генератора шагательных движений. Данные методы воздействия на спинной мозг имеют отличительные черты их генеза, а также некоторые особенности постактивационных эффектов, прослеживающихся в изменении функционального состояния нейрональных сетей спинного мозга. С учетом установленных механизмов инициации вызванных шагательных движений и специфики постактивационных эффектов представлялось оправданным изучить возможности изменения состояния моторной системы с помощью неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга.

### **Цель исследования**

Целью исследования явилось изучение влияния длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние моторной системы человека, а также возможностей повышения мышечной силы посредством электровоздействия.

### **Задачи исследования**

1. Выявить особенности изменений мышечной силы при воздействии на скелетную мышцу ритмической электрической и электромагнитной стимуляции различной интенсивности и частоты.

2. Изучить динамику моторных ответов мышц нижних конечностей при увеличении интенсивности электростимуляционного воздействия на поясничное утолщение спинного мозга и периферический нерв.

3. Определить особенности мышечных ответов, вызываемых электрической стимуляцией спинного мозга, с целью разработки оптимального режима электростимуляционного воздействия для повышения силы мышц голени.

4. Исследовать механизмы изменений силовых способностей человека и проявления нерцепторного торможения  $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц под влиянием продолжительной чрескожной ритмической электростимуляции спинного мозга.

### **Научная новизна работы**

В диссертационном исследовании разработан новый методический

подход повышения мышечной силы посредством длительной электрической стимуляции спинного мозга. Получены ранее неизвестные сведения об изменении мышечной силы при увеличении интенсивности и частоты электрического и электромагнитного воздействия на скелетную мышцу. Показано, что электрическая стимуляция приводит к более значительному увеличению максимального момента сил в сравнении с электромагнитной стимуляцией. Выявлено укорочение латентности и повышение амплитуды мышечных ответов в условиях прогрессивно нарастающего по силе электрического воздействия на спинной мозг и периферический нерв, что свидетельствует о последовательном рекрутировании  $\alpha$ -мотонейронов спинного мозга, связанных с быстрыми мышечными волокнами. Разработана оригинальная схема нерцепрокной тормозной интернейрональной цепи, способствующей регуляции возбудимости спинальных  $\alpha$ -мотонейронов под влиянием длительной электрической стимуляции спинного мозга в состоянии относительного мышечного покоя и в сочетании со слабым по величине напряжением мышц голени. Доказаны неизвестные ранее закономерности о влиянии длительной электрической стимуляции спинного мозга на повышение силовых способностей мышц, выражающиеся в приросте максимального момента сил, увеличении активности нисходящих супраспинальных влияний на интернейрональный аппарат спинного мозга и модуляции нерцепрокного торможения спинальных  $\alpha$ -мотонейронов, обеспечивающего оптимальное функционирование поддержания напряженности скелетных мышц.

### **Научно-практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что в ней представлены новые факты о повышении силовых способностей посредством длительной электрической стимуляции спинного мозга, которые имеют значение для развития теоретических представлений о факторах, определяющих эффективность различных по своей природе внешних стимуляционных воздействий на моторную систему человека. Изучены особенности моторных ответов, вызываемых стимуляцией нервных структур и мышечного аппарата. Расширено представление о влиянии длительной электрической стимуляции спинного мозга на проявление нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов спинного мозга. Впервые показано, что активность нерцепрокного торможения на спинальном уровне в состоянии

покоя и при произвольном напряжении мышц стопы зависит от длительной электрической стимуляции спинного мозга.

Практическая значимость исследования состоит в том, что разработанный в его процессе метод повышения мышечной силы посредством длительной электрической стимуляции спинного мозга может быть применен при моделировании целенаправленного воздействия силовых тренировочных программ на функциональное состояние моторной системы спортсменов. Особенности двигательных ответов, вызываемых стимуляцией моторной зоны коры, спинного мозга, мышц, и проявления нерцепторного торможения  $\alpha$ -мотонейронов под влиянием продолжительной чрескожной ритмической электростимуляции спинного мозга углубляют наши представления об адаптации организма человека к различным стимуляционным воздействиям.

Предложенные в работе практические рекомендации могут быть использованы в качестве основы для проведения в соответствующих научных лабораториях дальнейших исследований механизмов влияния длительного электрического воздействия на состояние различных структур центральной нервной системы и мышечного аппарата человека.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Постактивационный эффект, вызываемый двадцатиминутной электрической стимуляцией спинного мозга, сохраняется до десяти минут, что отражается в повышенном уровне мышечной силы, характеристиках электромиограмм мышц, регистрируемых при выполнении максимального сокращения мышц голени, и в усилении нерцепторного торможения спинальных  $\alpha$ -мотонейронов после выполнения слабого по величине мышечного напряжения.

2. Увеличение силы мышц под влиянием длительной электрической стимуляции спинного мозга сопровождается повышением рефлекторной возбудимости мотонейронных пулов, обеспечивающих реализацию максимального произвольного усилия.

3. Продолжительная электрическая стимуляция спинного мозга изменяет состояние спинальных тормозных нейрональных сетей двигательного контроля и возбудимость моторной зоны коры головного мозга, но не оказывает существенного влияния на электрогенные свойства скелетных мышц нижних конечностей.

## **Апробация работы**

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на XXIII съезде Физиологического общества имени И.П. Павлова (Россия, г. Воронеж, 2017), XII Международной научно-практической конференции «Проблемы физической культуры населения, проживающего в условиях неблагоприятных факторов окружающей среды» (Республика Беларусь, г. Гомель, 2017), Международной научно-практической конференции «Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития» (Россия, г. Казань, 2017), Всероссийской научно-практической конференции «Современные методы организации тренировочного процесса, оценки функционального состояния и восстановления спортсменов» (Россия, г. Челябинск, 2017), V Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте» (Россия, г. Москва, 2017), Международном научно-практическом конгрессе, посвященном 100-летию ГЦОЛИФК «Научно-педагогические школы в сфере физической культуры и спорта» (Россия, г. Москва, 2018), VIII и IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации» (Россия, г. Краснодар, 2018, 2019), IX Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности, посвящённой памяти Е.Е. Никольского «Новые подходы к изучению классических проблем» (Россия, г. Москва, 2019), XXX Международной научно-практической конференции «Научный форум: Медицина, биология и химия» (Россия, г. Москва, 2020), XXXI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Россия, г. Пенза, 2020), X Юбилейной международной научно-практической конференции «Физическое воспитание, спорт, физическая реабилитация и рекреация: проблемы и перспективы развития» (Россия, г. Красноярск, 2020), III Всероссийской научно-практической конференции «Физиология человека» (Россия, г. Чебоксары, 2020), X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации» (Россия, г. Краснодар, 2020),

открытой научно-практической конференции «Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы», посвящённой Году науки и технологий (Россия, г. Великие Луки, 2021).

**Личный вклад автора** состоит в его непосредственном участии во всех этапах исследовательского процесса: анализе литературы по исследуемой проблеме, постановке задач, разработке новых и модификации существующих экспериментальных моделей, сборе экспериментальных данных, анализе полученного материала, проверке статистических гипотез и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке основных научных публикаций, написании текста диссертации и автореферата.

### **Публикации**

Основные положения и результаты диссертации изложены в 23 публикациях, 4 из которых размещены в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание учёных степеней; одна публикация размещена в журнале, входящем в библиографическую и реферативную базу цитирования Scopus. Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта» (ФГБОУ ВО «ВЛГАФК»), в практику МБУ ДО «Детско-юношеская школа №3 «Олимпия», Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «ВЛГАФК», ООО медицинского центра «МедТайм». Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-04-00371.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения и 5 глав, включающих обзор литературы, описание организации и методов исследования, изложение результатов собственных исследований и их обсуждение, а также заключения, выводов, практических рекомендаций, списков сокращений и условных обозначений, литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 146 страницах машинописного текста, иллюстрирован 15 таблицами и 19 рисунками. Библиографический указатель включает 239 источников, из них 109 – иностранных авторов.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование проводилось на базе Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «ВЛГАФК» в период с 2016 по 2019 г.

В экспериментах принял участие 61 здоровый испытуемый мужского пола в возрасте от 19 до 35 лет, от которых было получено информированное согласие на участие в исследовании в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (WMA Declaration of Helsinki - Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects, 2013), а также разрешение на обработку персональных данных. Исследование было одобрено комиссией по вопросам биоэтики ФГБОУ ВО «ВЛГАФК».

Исходя из задач диссертационной работы, были использованы следующие **методы исследования**: 1) динамография; 2) поверхностная и вызванная электромиография; 3) электромагнитная стимуляция мышц и коры головного мозга; 4) электрическая стимуляция спинного мозга и скелетных мышц; 5) методы математико-статистической обработки.

**Первая серия экспериментов** была посвящена изучению изменения величины момента мышечных сил (ММС) при увеличении интенсивности электрической (стимулятор «Нейро-МВП-8», ООО «Нейрософт», Россия) и электромагнитной (стимулятор «Magstim Rapid 2», Magstim Company Ltd, Spring Gardens, Великобритания) стимуляции *m. gastrocnemius med.* (GM) при постоянной частоте стимуляции 10 Гц. Вначале каждому испытуемому наносили электрическую, а после магнитную стимуляцию в положении сидя на комплексе «Biodex» (США) такой интенсивности, чтобы при концентрическом сокращении (подошвенном сгибании стопы) ММС достигал 3 Н·м. Такие показатели интенсивности принимались за фоновые. В этом случае сила электростимула у разных испытуемых составляла от 17 мА до 23 мА, а магнитного стимула – от 42% до 55% от максимального выхода стимулятора. В дальнейшем интенсивность стимула в обоих видах стимуляции увеличивалась с шагом 10%. При электростимуляции GM активный электрод локализовался на ее двигательной точке, индифферентный смещался к *tendo calcaneus*. При магнитной стимуляции использовали плоский койл диаметром 50 мм, который локализовался в проекции двигательной точки GM. Длительность пачек электрической и магнитной стимуляции была равна 5 с, отдых между сериями

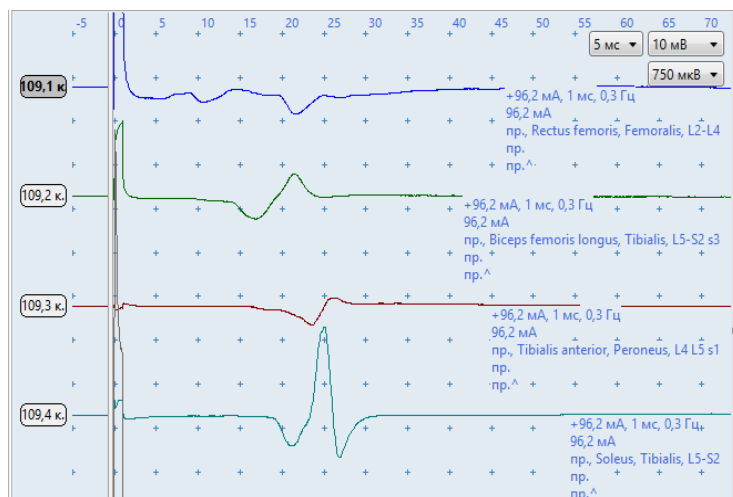
стимулов составлял 30 с, а при переходе от одного вида стимуляции к другому – 5 мин.

В этой же серии экспериментов изучалось изменение величин ММС при повышении частоты электрического и электромагнитного стимуляционного воздействия. Расположение стимулирующих электродов и койла магнитного стимулятора, длительность пачки стимулов были аналогичны описанному выше эксперименту. Интенсивность стимуляции у каждого испытуемого определяли при частоте 1 Гц, которая обеспечивала развитие усилия в 3 Н·м. При электростимуляции интенсивность стимула равнялась 27 мА - 44 мА, а при электромагнитной – 64% - 75% от максимального выхода стимулятора. Частота используемых видов стимуляции ступенчато возрастала с 1 Гц (фон) до 25 Гц шагом в 5 Гц. Интервал отдыха между сериями стимулов и переход к другому виду стимуляции был таким же, как в предыдущем эксперименте.

**Вторая серия экспериментов** посвящена исследованию изменения амплитуды, латентного периода и формы вызванных моторных ответов (ВМО) при увеличении интенсивности однократного электрического воздействия на поясничное утолщение спинного мозга и периферический нерв. Регистрация параметров ВМО с мышц нижней конечности (*m. rectus femoris* – RF, *m. biceps femoris* – BF, *m. tibialis anterior* – TA, *m. soleus* – SOL) осуществлялась при ступенчатом повышении интенсивности прямоугольного стимула (стимулятор «Нейро-МВП-8», ООО «Нейрософт», Россия), наносимого на кожную поверхность в проекции между остистыми отростками T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков в положении испытуемого лежа на животе (K. Minassiana et al., 2007). Изначально для каждого испытуемого индивидуально подбиралась пороговая сила стимула для вызова моторного ответа с исследуемых мышц нижних конечностей: RF – 57,82±6,98 мА, BF – 67,86±5,51 мА, TA – 71,95±5,85 мА, SOL – 71,13±5,85 мА. Затем при каждой последующей стимуляции сила стимула увеличивалась на 5% по отношению к предыдущей, длительность стимула составляла 0,5 мс, интервалы между стимулами – 15 с. Оригинальная запись мышечных ответов, вызванных электрической стимуляцией спинного мозга, обрабатывалась в компьютерной программе «Нейро-МВП.NET» (ООО «Нейрософт», Россия, 2006) и представлена на рисунке 1.

При исследовании амплитуды и латентного периода М-ответа и Н-рефлекса SOL в условиях увеличения силы однократного электрического

воздействия на n. tibialis (стимулятор «Нейро-МВП-8», ООО «Нейрософт», Россия) испытуемые находились на кушетке в горизонтальном положении на спине (В.Н. Команцев, В.А. Заболотных, 2001; Р.М. Городничев, 2005; E. Pierrot-Deseilligny, D. Burke, 2012; А.А. Челноков, 2016). Пороговая сила для вызова мышечных ответов SOL по группе была в диапазоне от 3 мА до 8,4 мА, а для Н-рефлекса – от 5,4 мА до 18,2 мА. После определения пороговой силы раздражителя регистрировались максимальная и средняя величины амплитуды М-ответа и Н-рефлекса SOL.



**Рисунок 1** – Образец записи мышечных ответов, вызываемых электрической стимуляцией спинного мозга

**Третья серия экспериментов** была направлена на изучение особенностей изменения показателей ММС с одновременной регистрацией электромиографической активности (ЭМГ-активности), ВМО и М-ответов GM и ТА под воздействием длительной электрической стимуляции спинного мозга. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ; стимулятор «Нейро-МВП-8») осуществлялась на уровне T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков в положении лежа на спине в течение 20 минут (Р.М. Городничев и др., 2012; Y. Gerasimenko et al., 2010, 2015). Интенсивность стимула на протяжении первых 10 минут находилась в пределах 30 мА, а в дальнейшем достигала 40 мА. Длительность однократного стимула составляла 0,5 мс, частота следования стимулов – 10 Гц. У испытуемых до и после нанесения электрической стимуляции спинного мозга, а также через 5, 10, 20, 30 минут после её прекращения регистрировались: ММС, поверхностная ЭМГ GM и ТА при реализации максимального усилия (изометрический тип сокращения), а также их моторные ответы, вызываемые электростимуляцией спинного мозга, и

максимальная амплитуда М-ответов указанных выше мышц.

Для оценки координационных взаимодействий мышц в системе агонист-антагонист до и после воздействия электрической стимуляции спинного мозга рассчитывался коэффициент реципрокности: амплитуда ЭМГ ТА / амплитуда ЭМГ GM  $\times 100\%$  (В.Н. Команцев, В.А. Заболотных, 2001).

**В четвертой серии экспериментов** изучалось изменение амплитуды моторных ответов, вызываемых воздействием пороговых и максимальных электромагнитных стимулов на двигательную зону коры. Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС; стимулятор «Magstim Rapid 2», Magstim Company Ltd, Spring Gardens, Великобритания) моторной зоны больших полушарий наносилась в области представительства исследуемых мышц с использованием угловой катушки (диаметр  $2 \times 110$  мм) (С.С. Никитин, А.Л. Куренков, 2003). Регистрацию и анализ амплитуды ВМО GM и ТА осуществляли при пороговой ( $55,37 \pm 2,73\%$ ) и максимальной ( $95,00 \pm 2,50\%$ ) силе ТМС. Стимулы наносились до и после 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга на 1, 10, 20, 30 минутах последействия.

**В пятой серии экспериментов** изучалось влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на выраженность нерцепрожного торможения  $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц. Для регистрации нерцепрожного торможения гомонимных  $\alpha$ -мотонейронов SOL использовали коротколатентную кондиционирующую стимуляцию n. common peroneal за 6 мс до тестирующего стимула на n. tibialis (Мини-Электромиограф АНО «Возвращение», Россия). Выявленность нерцепрожного торможения анализировалась по степени подавления амплитуды тестирующего Н-рефлекса SOL при нанесении кондиционирующего стимула на n. common peroneal (E. Pierrot-Deseilligny et al., 1979; А.А. Челноков и др., 2017). Регистрацию нерцепрожного торможения  $\alpha$ -мотонейронов SOL осуществляли в следующих экспериментальных условиях: 1) в состоянии покоя до воздействия длительной ЧЭССМ, во время воздействия, на 5, 10, 20 минутах, и после ее воздействия, на 5, 10, 20, 30 минутах; 2) при удержании изометрического усилия, составляющего 5% от максимального произвольного сокращения (МПС), до воздействия длительной ЧЭССМ, во время воздействия, на 5, 10, 20 минутах, и после ее воздействия, на 5, 10, 20, 30 минутах.

Математико-статистический анализ проводился при помощи пакетов

программ «Microsoft Office Excel 2013» и «Statistica 12.5». С помощью Shapiro-Wilk's W test оценивали нормальность распределения выборок и в соответствии с полученными результатами для определения достоверности различий (P) между исследуемыми параметрами использовали параметрический Student T-test, однофакторный дисперсионный анализ с post-hoc анализом Newman-Keuls и непараметрический Wilcoxon test, Mann-Whitney U-test, дисперсионный анализ Kruskal-Wallis Anova.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **ОСОБЕННОСТИ МОТОРНЫХ ОТВЕТОВ, ВЫЗЫВАЕМЫХ СТИМУЛЯЦИЕЙ НЕРВНЫХ СТРУКТУР И МЫШЕЧНОГО АППАРАТА**

В данном разделе представлены результаты исследования показателей мышечной силы при увеличении интенсивности и частоты ритмического электрического воздействия на скелетную мышцу, динамики параметров моторных ответов, вызванных различной по интенсивности стимуляцией спинного мозга и периферического нерва человека.

#### **Изменение мышечной силы при увеличении интенсивности и частоты электрической и электромагнитной стимуляции *m. gastrocnemius medialis***

Результаты первой серии экспериментов показали, что при повышении интенсивности используемых видов стимуляционного воздействия увеличивалась величина момента мышечных сил. Увеличение ММС происходило на каждом последующем уровне стимуляции по сравнению с предыдущим (табл. 1). Из анализа данных таблицы 1 видно, что электрическая стимуляция в сравнении с электромагнитной на всём протяжении возрастания интенсивности стимула вызывала более значительный прирост величины момента сил.

Наибольшее значение исследуемого параметра отмечалось при повышении интенсивности стимуляционного воздействия на 60% по отношению к пороговой величине. Так, при повышении силы электрической стимуляции на 60% величина ММС возросла по сравнению с фоном на 11,27 Н·м, а при магнитной – на 4,46 Н·м (табл. 1). Прирост значений ММС при увеличении интенсивности электрического стимула до 60% составил 375,75% по сравнению с исходными показателями и 185,51% – в сравнении с электромагнитной стимуляцией (в обоих случаях  $P < 0,05$ ).

**Таблица 1** – Динамика показателей ММС (Н·м) при увеличении силы стимуляционного воздействия ( $M \pm SE$ ,  $n = 11$ )

Вид стимуляции	Фон	Повышение интенсивности стимула в сравнении с исходными величинами (%)					
		10	20	30	40	50	60
Электрическая	3,01	4,75	6,53	8,91	10,23	12,62	14,28
	$\pm$ 0,06	$\pm$ 0,28*	$\pm$ 0,47*	$\pm$ 1,02*	$\pm$ 0,83*	$\pm$ 1,61*	$\pm$ 2,06*
Электромагнитная	2,83	3,01	3,77	5,06	5,93	6,95	8,23
	$\pm$ 0,05	$\pm$ 0,28	$\pm$ 0,29*	$\pm$ 0,45*	$\pm$ 0,61*	$\pm$ 0,45*	$\pm$ 0,75*
$P_{\text{Электр.} \times \text{Электромагнит.}}$	>0,05	>0,05	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>

**Примечание:** здесь и в таблицах 2, 3, 4, 5 \* – достоверность различий показателей в сравнении с исходными величинами (фон); § –  $P < 0,05$  – достоверность различий в показателях ММС между электрической и электромагнитной стимуляциями (Kruskal-Wallis Anova)

Анализ динамики ММС при увеличении частоты стимуляционного воздействия выявил, что электрическая стимуляция в сравнении с электромагнитной приводит к наибольшей силе мышечных сокращений, и поэтому величина ММС при данном виде стимуляции достигала максимальных значений (табл. 2). Так, при нанесении электрической стимуляции с частотой в 25 Гц величина ММС по отношению к фоновому показателю достоверно повысилась на 17,35 Н·м (944,41%,  $p < 0,05$ ), а при электромагнитной – на 7,03 Н·м (334,48%,  $p < 0,05$ ).

**Таблица 2** – Динамика величины ММС (Н·м) при повышении частоты стимуляционного воздействия ( $M \pm SE$ ,  $n = 11$ )

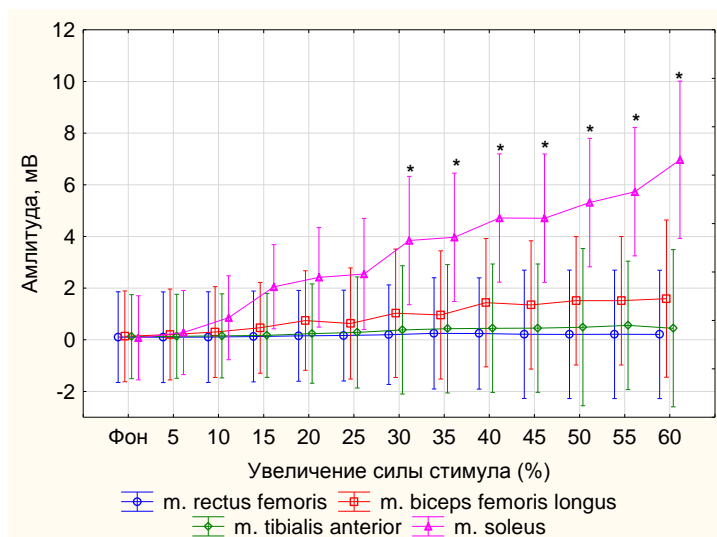
Вид стимуляции	Фон	Частота стимуляции (Гц)				
		5	10	15	20	25
Электрическая однофазная	2,11 $\pm$ 0,05	2,47 $\pm$ 0,23	5,96 $\pm$ 1,07*	10,92 $\pm$ 2,01*	15,76 $\pm$ 3,33*	19,46 $\pm$ 4,13*
Электромагнитная	2,08 $\pm$ 0,03	2,18 $\pm$ 0,31	3,75 $\pm$ 0,69*	6,25 $\pm$ 1,05*	8,51 $\pm$ 1,61*	9,11 $\pm$ 1,61*
$P_{\text{Электр.} \times \text{Электромагнит.}}$	>0,05	>0,05	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>	<0,05 <sup>§</sup>

Сравнительный анализ эффектов двух видов стимуляционного воздействия на скелетную мышцу свидетельствует, что при увеличении силы и частоты электрической стимуляции наблюдался более значительный прирост величины ММС в сравнении с электромагнитным стимуляционным воздействием. В связи с этим в дальнейших экспериментах исследовалось

влияние чрескожной электрической стимуляции спинного мозга и периферического нерва на состояние моторной системы человека.

### Изменение параметров вызванных мышечных ответов при увеличении силы однократного электрического воздействия на спинной мозг и периферический нерв

Результаты оценки параметров ВМО при увеличении интенсивности стимуляционного воздействия на спинной мозг показали, что с возрастанием силы электрической стимуляции наблюдалось повышение амплитуды вызванных моторных ответов скелетных мышц голени. Максимальный прирост амплитуды ВМО всех мышц был зарегистрирован при увеличении интенсивности электрической стимуляции на 60% по отношению к пороговому значению (рис. 2). Как видно из рисунка 2, амплитуда ВМО RF и ТА при ступенчатом увеличении силы стимула повышалась в значительно меньшей степени по сравнению с другими исследуемыми мышцами.



**Рисунок 2** – Изменение максимальной амплитуды ВМО при увеличении интенсивности стимуляции спинного мозга на уровне T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков, мВ: здесь и на рисунке 3 \* – P<0,05 – достоверность различий между соответствующим параметром и его исходной величиной (Kruskal-Wallis Anova)

Наибольший прирост величины ВМО отмечался у SOL, амплитуда её моторного ответа с повышением силы стимуляционного воздействия на 60% увеличилась на 6,89±3,68 мВ (P<0,05) от фона, что в 98,88 раз превысило исходный уровень. Однако, прирост амплитуды ВМО RF был по отношению к фоновой величине незначителен, с повышением силы воздействия до 60% он составил только лишь 0,103 мВ (P>0,05). Амплитуда ВМО ТА возросла на 0,325

мВ и не имела достоверных отличий от исходного уровня ( $P>0,05$ ), а BF – на 1,457 мВ ( $P>0,05$ ).

Из таблицы 3 видно, что латентный период ВМО RF с увеличением интенсивности электростимуляции на 25% по отношению к пороговой величине уменьшился на 1,24 мс ( $P<0,05$ ). Латентное время ВМО TA и SOL с повышением силы электрического стимула на 60% снизилось на 5,52 мс ( $P<0,05$ ) и 9,04 мс ( $P<0,05$ ), соответственно. Латентность ВМО RF была наименьшей из всех исследуемых мышц и при пороговом стимуле равнялась 8,44 мс. Значение исследуемого параметра при той же силе стимула было наибольшим у SOL и составляло 20,24 мс. Таким образом, укорочение латентного периода у SOL было максимальным в сравнении с другими мышцами.

**Таблица 3** – Изменение латентного периода (мс) мышечных ответов при повышении интенсивности электрической стимуляции спинного мозга ( $M\pm SE$ ,  $n=7$ )

Интенсивность стимуляции	Латентный период (мс)			
	m. rectus femoris	m. biceps femoris longus	m. tibialis anterior	m. soleus
Пороговая	8,44±1,4	13,78±1,0	17,42±1,4	20,24±1,2
25%	7,2±1,3*	11,9±2,0	15,1±0,8	17,2±1,6
60%	7,03±1,4	11,2±1,2	11,9±1,0*	11,2±0,9*

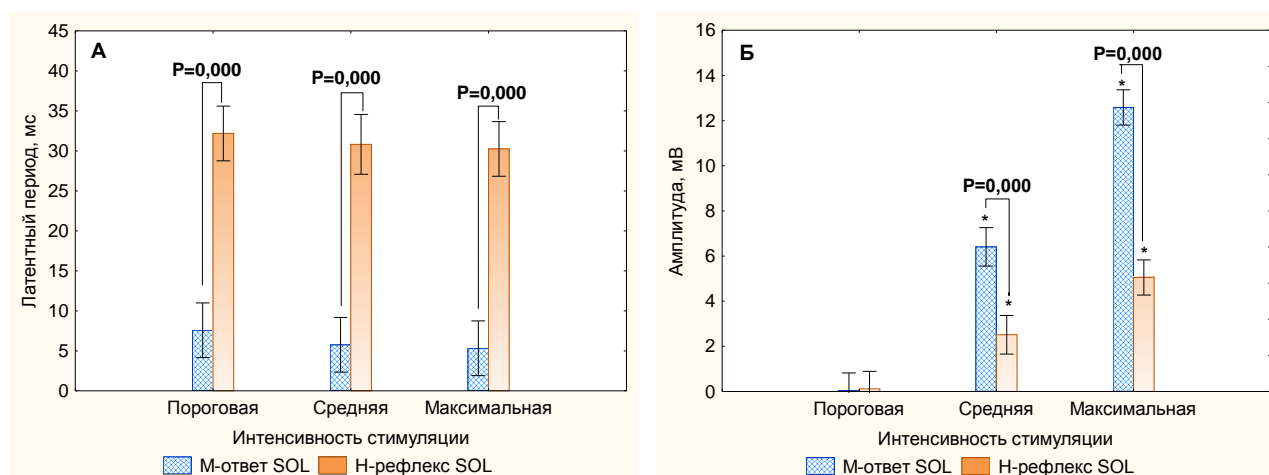
Таким образом, в результате настоящего исследования выявлено увеличение амплитуды вызванных моторных ответов и укорочение латентных периодов дистальных мышц голени при повышении интенсивности однократного электрического воздействия в проекции между остистыми отростками T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков. Результаты проведенных ранее экспериментов позволяют предполагать, что воздействие электрической стимуляции на уровне T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков первоначально активирует афференты большого диаметра, локализованные в дорсальных корешках спинного мозга (Р.М. Городничев и др., 2012; Y. Gerasimenko et al., 2015).

Результаты анализа изменения латентного периода и амплитуды мышечных ответов SOL при пороговой (7,06±1,24 мА), средней (25,30±5,67 мА) и максимальной (73,58±11,48 мА) электростимуляции n. tibialis и тех же



показателей Н-рефлекса при пороговой ( $10,16 \pm 2,04$  мА), средней ( $13,24 \pm 2,88$  мА), максимальной ( $16,11 \pm 2,51$  мА) интенсивности стимуляции представлены на рисунке 3. Следует отметить факт, что укорочение латентного периода SOL наблюдается при увеличении силы раздражителя. При средней силе стимула латентное время мышечного ответа SOL уменьшилось по отношению к фоновой величине на 25,69%, а при максимальной интенсивности – на 36,10%. Аналогичная закономерность, связанная с укорочением времени латентной реакции при увеличении силы стимуляционного воздействия, отмечалась и во время регистрации Н-рефлекса SOL. Так, при среднем по силе стимуле время латентной реакции SOL по отношению к пороговой величине снизилось на 4,55%, при максимальном по силе воздействии – на 6,27%.

Максимальная амплитуда М-ответа SOL при электростимуляции *n. tibialis* была значительно выше, чем амплитуда Н-рефлекса (рис. 3). Так, максимальная амплитуда М-ответа достигала 12,60 мВ, что превышало максимальную амплитуду Н-рефлекса на 149,50%.



**Рисунок 3** – Изменение латентного периода (А) и амплитуды (Б) мышечных ответов *m. soleus* при электростимуляции *n. tibialis*

Сопоставительный анализ амплитуды и латентного периода мышечных ответов, вызываемых стимуляционным воздействием, в одном случае, на спинной мозг, а в другом – на *n. tibialis*, свидетельствует, что моторные ответы при электростимуляции спинного мозга по всем указанным величинам в большей степени приближены к ответам, получаемым во время регистрации Н-рефлекса.

Результаты исследования по изменению мышечной силы при увеличении интенсивности и частоты ритмического электрического воздействия на

скелетную мышцу, динамики параметров моторных ответов, вызванных различной по интенсивности стимуляцией спинного мозга и периферического нерва, позволили выбрать оптимальный режим продолжительного электрического воздействия на спинной мозг с целью направленного изменения состояния моторной системы человека.

### **ЭФФЕКТ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ СПИННОГО МОЗГА НА СИЛОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ПРОЯВЛЕНИЕ НЕРЕЦИПРОКНОГО ТОРМОЖЕНИЯ $\alpha$ -МОТОНЕЙРОНОВ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ**

В данной главе представлены материал и результаты изучения показателей ММС с единовременной регистрацией ЭМГ, ВМО и М-ответов мышц голени, амплитуды моторных ответов, вызываемых воздействием пороговых и максимальных электромагнитных стимулов на моторную зону коры, под влиянием длительной чрескожной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга на уровне T<sub>11</sub>-T<sub>12</sub> грудных позвонков, а также исследования функциональной активности нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов SOL человека под влиянием продолжительной чрескожной ритмической электростимуляции спинного мозга в состоянии относительного мышечного покоя и при удержании слабого по величине статического усилия.

#### **Изменение показателей мышечной силы под воздействием длительной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга**

Результаты анализа зарегистрированных величин ММС показали, что сразу после окончания 20-минутной ЧЭССМ наблюдалось достоверное увеличение этого параметра (табл. 4). Непосредственно после электростимуляционного воздействия прирост величины мышечной силы по отношению к фоновому значению составлял 13,17 Н·м ( $P < 0,05$ ). Выявлено, что амплитуды ЭМГ, ВМО и М-ответа GM и TA проявляли тенденцию к повышению сразу после окончания электрической стимуляции спинного мозга, однако, статистически достоверных различий не наблюдалось ( $P > 0,05$ , табл. 4).

В результате исследования изменения величины ММС через 5, 10, 20, 30 минут после прекращения 20-минутной стимуляции спинного мозга установлен достоверный прирост данного показателя на 5 и 10 минутах восстановления по отношению к значениям, зарегистрированным до стимуляции (табл. 5). В этом случае величина ММС по отношению к фону достоверно повысилась на 15,40

Н·м ( $P < 0,05$ ) и 17,03 Н·м ( $P < 0,05$ ), соответственно. С 20 по 30 минуты после окончания электростимуляции отмечалось снижение величины мышечной силы практически до значений, зарегистрированных до стимуляции спинного мозга, что свидетельствует о постепенном восстановлении исследуемого параметра ( $P > 0,05$ ).

**Таблица 4** – Эффект воздействия длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на показатели максимального момента сил, амплитуды ЭМГ, ВМО и М-ответа *m. gastrocnemius* и *m. tibialis anterior* ( $M \pm SE$   $n=13$ )

Амплитуда	До стимуляции спинного мозга (фон)	После стимуляции спинного мозга
Максимальный момент сил (Н·м)	124,51±6,07	137,68±7,52*
ЭМГ GM (мкВ)	384,72±59,92	431,47±67,32
ВМО GM (мВ)	2,38±0,49	2,52±0,39
М-ответ GM (мВ)	13,49±1,94	14,79±1,82
ЭМГ TA (мкВ)	134,25±38,32	115,63±21,52
ВМО TA (мВ)	0,38±0,05	0,38±0,07
М-ответ TA (мВ)	3,53±0,42	3,55±0,38

**Таблица 5** – Эффект воздействия длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на показатели момента мышечных сил, амплитуды ЭМГ, ВМО, М-ответа *m. gastrocnemius* и *m. tibialis anterior*, зарегистрированные на 5, 10, 20, 30 минутах после окончания стимуляции ( $M \pm SE$   $n=13$ )

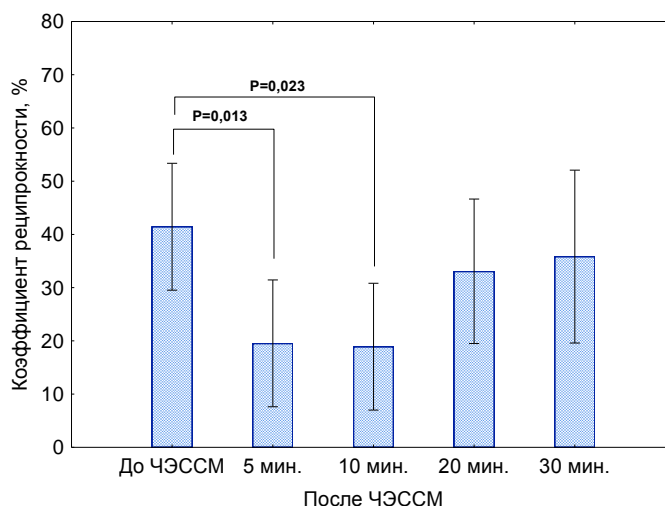
Показатели	Фон	После окончания стимуляции (мин.)			
		5	10	20	30
Максимальный момент сил (Н·м)	124,57±7,73	139,97±7,45*	141,60±5,84*	136,48±8,06	125,42±5,22
ЭМГ GM (мкВ)	384,72±59,92	448,41±70,56*	424,68±54,40	423,50±67,22	412,44±46,84
ВМО GM (мВ)	2,38±0,49	2,97±0,48	3,21±0,55*	2,96±0,46	2,23±0,50
М-ответ GM (мВ)	13,49±1,94	15,19±2,35	14,84±2,20	15,61±2,19	13,38±1,29
ЭМГ TA (мкВ)	134,25±38,32	107,49±23,59	100,12±24,26	131,01±39	141,91±30,84
ВМО TA (мВ)	0,38±0,05	0,38±0,07	0,42±0,06	0,32±0,05	0,37±0,05
М-ответ TA (мВ)	3,53±0,42	3,55±0,38	3,88±0,38	3,92±0,37	4,00±0,45

Значения амплитуды ЭМГ, ВМО, М-ответа GM после воздействия электрической стимуляции спинного мозга, представленные в таблице 5, свидетельствуют о достоверном увеличении амплитуды ЭМГ на 5 минуте

( $P < 0,05$ ), а амплитуды ВМО – на 10 минуте ( $P < 0,05$ ). Напротив, амплитуда ЭМГ, ВМО, М-ответа ТА после воздействия электрической стимуляцией на спинной мозг не претерпевала каких-либо статистически значимых изменений ( $P > 0,05$ , табл. 5).

Из данных, представленных на рисунке 4, видно, что на 5 и 10 минут после воздействия электрической стимуляции спинного мозга отмечалось достоверное снижение коэффициента реципрокности (на 21,91% и 22,54%, соответственно).

Таким образом, длительная электрическая стимуляция спинного мозга, а, следовательно, активация его нейрональных сетей, вероятно, усиливает реципрокность во взаимоотношениях флексоров и экстензоров за счет более активного проявления эффекта реципрокного торможения.



**Рисунок 4** – Эффект воздействия длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на величины коэффициента реципрокности *m. gastrocnemius* и *m. tibialis anterior*, %:  $P < 0,05$  – уровень достоверных различий между величинами до и после воздействия (Wilcoxon test)

#### **Изменения мышечных ответов, вызываемых транскраниальной магнитной стимуляцией, под влиянием длительной электрической стимуляции спинного мозга**

Результаты анализа амплитуды моторных ответов мышцы-агониста голени, вызываемых пороговой и максимальной электромагнитной стимуляцией двигательной зоны коры головного мозга, показали, что после 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга отмечалось достоверное увеличение амплитуды ВМО GM на 1 и 10 минут ( $P < 0,05$ ) по отношению к величинам, зарегистрированным до электрической стимуляции

(табл. 6). В то же время амплитуда ВМО ТА, вызываемая пороговой и максимальной электромагнитной стимуляцией моторной коры головного мозга, не претерпевала статистически значимых изменений и практически оставалась на том же уровне, что и до воздействия электрической стимуляции на спинной мозг.

Экспериментальные факты об изменениях амплитуды ВМО исследуемых мышц при ТМС дают основание утверждать, что наибольшие величины данного показателя регистрируются у мышцы-агониста (GM) в течение 10 минут последствия длительной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга. Напротив, амплитуда ВМО мышцы-антагониста (ТА) не претерпевала статистически значимых изменений и практически оставалась на том же уровне, что и до воздействия электрической стимуляции на поясничное утолщение спинного мозга. Эти данные указывает на более выраженное влияние нисходящих потоков из коры головного мозга на мотонейронное ядро мышцы-агониста после длительного электростимуляционного воздействия на спинной мозг.

**Таблица 6** – Амплитуда моторных ответов (мВ) *m. gastrocnemius* и *m. tibialis anterior*, вызываемых ТМС, до и после длительной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга ( $M \pm SE$ ,  $n=8$ )

Сила стимула ТМС	До электрической стимуляции спинного мозга	После электрической стимуляции спинного мозга (мин.)			
		1	10	20	30
Пороговая GM	0,039±0,001	0,071±0,002*	0,077±0,003*	0,054±0,001	0,042±0,001
Максимальная GM	0,196±0,05	0,240±0,07*	0,270±0,04*	0,229±0,03	0,189±0,03
Пороговая ТА	0,119±0,03	0,213±0,07	0,210±0,06	0,175±0,05	0,152±0,04
Максимальная ТА	0,668±0,23	0,862±0,23	0,808±0,27	0,771±0,19	0,765±0,22

**Примечание:** \* –  $P < 0,05$  (Student T-test) – достоверность различий между соответствующими параметрами и их исходными величинами

В исследованиях с использованием методики регистрации активности отдельных нейронов моторной коры показано наличие различных популяций нейронов, кодирующих те или иные параметры двигательного действия (E.V. Evarts, 1967; A. Jackson et al., 2007). Одна часть нейронов моторной коры активна во время сгибания, другая – во время разгибания. Частота разрядов пропорциональна усилию, с которым выполняется двигательное действие.

Участие в сгибании или разгибании свойственно для кортикоспинальных нейронов, аксоны которых оканчиваются на спинальных  $\alpha$ -мотонейронах (K. Seki et al., 2009). Факт более высокой амплитуды ВМО мышцы-антагониста, вероятно, можно объяснить тем, что в норме у здоровых людей мышцы-сгибатели (*m. gastrocnemius* и *m. soleus*) находятся под более выраженным тормозным супраспинальным контролем (M. Knikou, 2008; Г.Г. Яфарова и др., 2017).

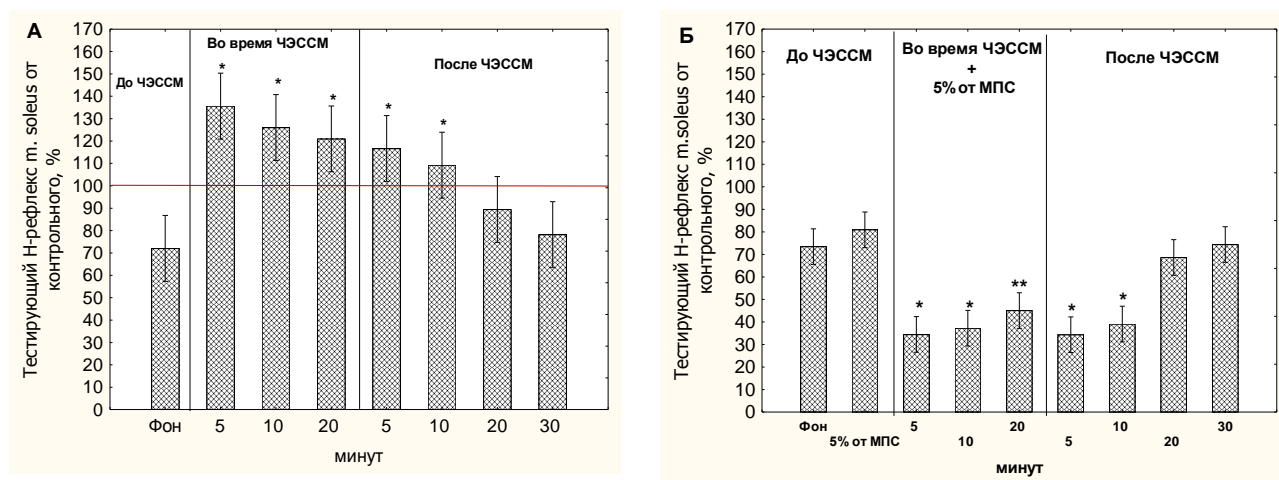
Полученные результаты свидетельствуют, что чрескожная электрическая стимуляция поясничного утолщения спинного мозга, проводимая в течение 20 минут, способствует повышению силовых возможностей мышцы-агониста голени. Это проявляется в увеличении показателей мышечной силы и продолжительном постактивационном эффекте электростимуляции, выражающемся в максимальных значениях следующих функциональных параметров: момент мышечных сил – на 5 и 10 минутах последствия, амплитуда ЭМГ – на 5 минуте, амплитуда ВМО – на 10 минуте. На наш взгляд, повышение показателей силы мышцы-агониста голени в результате воздействия длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга достигается, главным образом, модуляцией моторной команды, идущей из коры головного мозга по супраспинальным возбуждающим и тормозным трактам на Ia и Ib интернейроны и к  $\alpha$ -мотонейронам GM (А.А. Челноков, Р.М. Городничев, 2014).

#### **Влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на выраженность нерцепрокнутого торможения $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц**

Результаты исследований показали, что во время длительной электрической стимуляции спинного мозга в состоянии покоя нерцепрокнутое торможение  $\alpha$ -мотонейронов SOL инвертируется на нерцепрокнутое облегчение (рис. 5А). Наибольшая выраженность нерцепрокнутого облегчения наблюдалась на 5 минуте электрической стимуляции спинного мозга ( $P < 0,05$ ), а наименьшая – на 20 минуте ( $P < 0,05$ ). После прекращения электровоздействия нерцепрокнутое облегчение ослаблялось вплоть до 10 минуты восстановления ( $P < 0,05$ ). Начиная с 20 минуты электрического последствия нерцепрокнутое облегчение инвертировалось на нерцепрокнутое торможение и достигало выраженности фоновых значений, зарегистрированных до стимуляции

спинного мозга ( $P>0,05$ ). Полное восстановление нерцепного торможения  $\alpha$ -мотонейронов SOL наступало на 30 минуте последствия электрической стимуляции спинного мозга ( $P>0,05$ ; рис. 5А).

Результаты анализа амплитуды тестирующего Н-рефлекса *m. soleus* от контрольного рефлекса, зарегистрированной до электрической стимуляции спинного мозга, показали, что при выполнении изометрического сокращения в 5% от МПС происходит незначительное ослабление нерцепного торможения  $\alpha$ -мотонейронов *m. soleus* ( $P>0,05$ ) по сравнению с состоянием покоя (фон) (рис. 5Б).



**Рисунок 5** – Амплитуда тестирующего Н-рефлекса *m. soleus* от контрольного рефлекса до, во время и после длительной электрической стимуляции поясничного утолщения спинного мозга, %: \* –  $P<0,01$ , \*\* –  $P<0,05$  – достоверность различий в амплитуде тестирующего Н-рефлекса *m. soleus* от контрольного рефлекса на 5, 10, 20 минутах стимуляции спинного мозга в покое (А), в сочетании с изометрическим сокращением в 5% от МПС (Б), на 5, 10, 20, 30 минутах после прекращения электрической стимуляции спинного мозга с фоном (А, Б) (One-way Anova с post-hoc анализом Newman-Keuls, Kruskal-Wallis Anova)

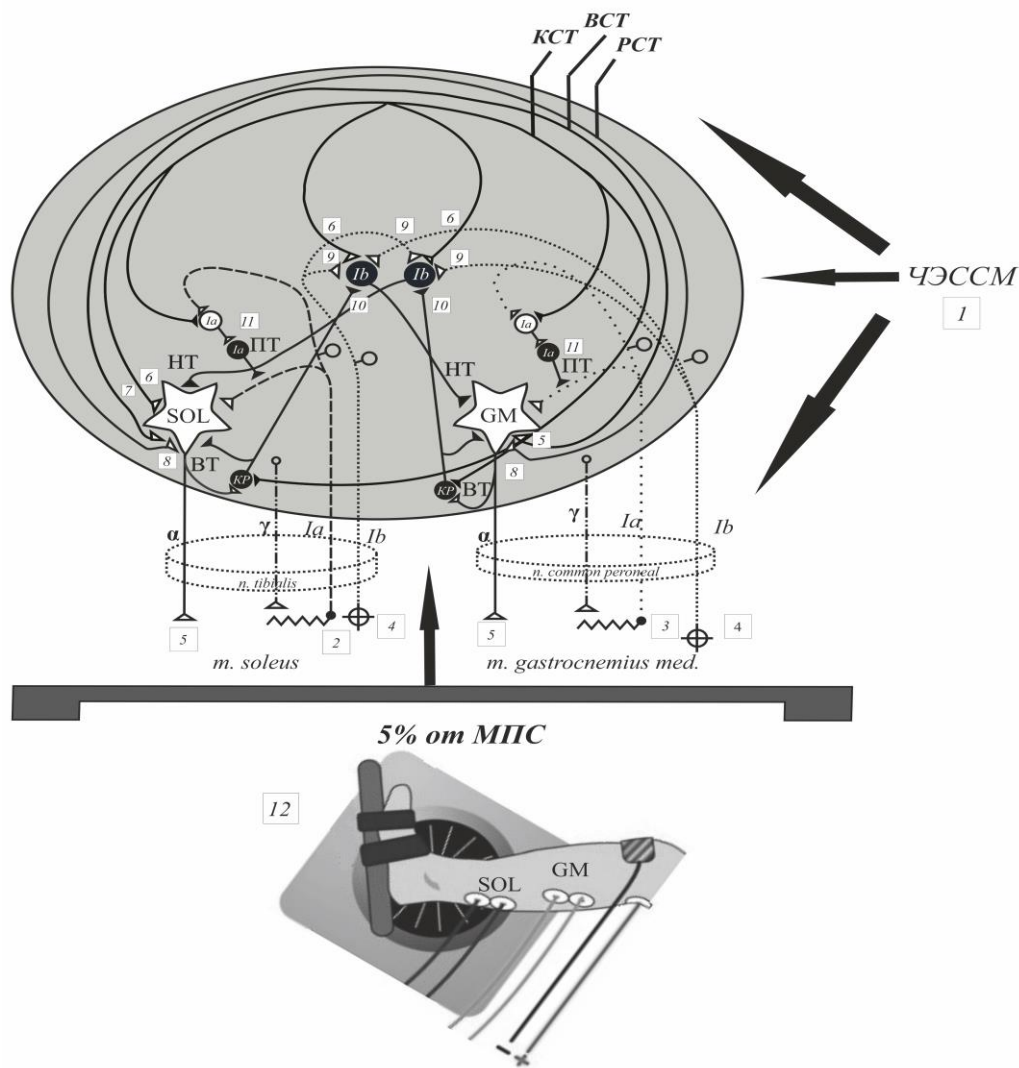
Во время длительной электрической стимуляции спинного мозга в сочетании с изометрическим сокращением в 5% от МПС происходило значительное усиление нерцепного торможения спинальных  $\alpha$ -мотонейронов по сравнению с фоном. Наиболее выраженное нерцепное торможение наблюдалось на 5 минуте электрической стимуляции спинного мозга ( $P<0,05$ ), а менее выраженное – на 20 минуте ( $P<0,05$ ). После

прекращения воздействия электрической стимуляции спинного мозга в сочетании с изометрическим сокращением в 5% от МПС усиление нерцепрокного торможения наблюдалось вплоть до 10 минуты стимуляционного последствия ( $P < 0,05$ ), а к 20 ( $P > 0,05$ ) и по 30 минуты ( $P > 0,05$ ) отмечалось его постепенное ослабление, которое достигало выраженности фоновых значений, что указывает на восстановление данного тормозного процесса на спинальном уровне (рис. 5Б).

Другими авторами, изучающими влияние длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на выраженность дисинаптического реципрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов и пресинаптического торможения афферентов Ia m. soleus в покое у здоровых людей, показано, что после 20-минутной электрической стимуляции спинного мозга реципрокное торможение усиливается в течение 15 минут последствия, а пресинаптическое торможение не отличается от исходного уровня на протяжении 30 минут последствия (Т. Yamaguchi et al., 2017). Авторы предполагают, что длительная электрическая стимуляция спинного мозга может индуцировать кратковременные пластические изменения в Ia интернейронах реципрокного торможения.

На основании имеющихся современных литературных данных и собственных результатов исследования нами разработана оригинальная схема нерцепрокной тормозной интернейрональной цепи, способствующей регуляции возбудимости спинальных  $\alpha$ -мотонейронов под влиянием длительной электрической стимуляции спинного мозга в состоянии относительного мышечного покоя и в сочетании со слабым по величине напряжением мышц голени (рис. б). Авторы-разработчики неинвазивного способа чрескожной электрической стимуляции спинного мозга высказывают предположение, что при воздействии электрической стимуляции на спинной мозг последовательно вовлекаются афференты группы Ia и Ib, афференты группы II, возбуждающие и тормозные спинальные интернейроны, реализующие поли- и олигосинаптические рефлекс, а также пирамидный, ретикулоспинальный и симпатический тракты (Р.М. Городничев и др., 2012).





12

- - Ia афференты *n. tibialis*; ● - Ia афференты *n. common peroneal*;
- ⊕ - Ib афференты *n. tibialis, n. common peroneal*;
- -  $\gamma$  - мотонейроны *m. soleus* (SOL), *m. gastrocnemius med.* (GM),
- ⊙ -  $\alpha$  - мотонейроны *m. soleus, m. gastrocnemius med.*;
- ⊙ - тормозные интернейроны Ia; ⊙ - тормозные интернейроны Ib;
- ⊙ - тормозные клетки Реншоу; ⊙ - возбуждающие интернейроны Ia;
- - нисходящие возбуждающие и тормозные потоки, идущие по кортикоспинальному тракту к  $\alpha$ -мотонейронам и интернейронам Ia и Ib;
- - нисходящие возбуждающие потоки, идущие по вестибулоспинальному тракту к  $\alpha$ -мотонейронам;
- - нисходящие возбуждающие потоки, идущие по ретикулоспинальному тракту к  $\alpha$ -мотонейронам;
- 1 - длительная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ);
- 2 3 4 5 - восходящие периферические влияния от Ia и Ib афферентов, и эфферентные коллатерали аксонов  $\alpha$ -мотонейронов;
- 6 7 8 - нисходящие супраспинальные влияния от кортико-, вестибуло- и ретикулоспинального трактов;
- 9 - нерцепрокное (Ib) торможение; 10 - возвратное торможение через клетку Реншоу;
- 11 - пресинаптическое торможение Ia афферентов;
- 12 - 5% от МПС (максимальное произвольное сокращение);
- KCT - кортикоспинальный тракт; BCT - вестибулоспинальный тракт;
- PCT - ретикулоспинальный тракт;
- ПТ - пресинаптическое торможение Ia афферентов;
- НТ - нерцепрокное торможение  $\alpha$ -мотонейронов;
- ВТ - возвратное торможение  $\alpha$ -мотонейронов.

**Рисунок 6** – Полагаемая схема тормозной интернейрональной сети мышц-агонистов голени, опосредуемой восходящими и нисходящими влияниями на спинальные мотонейроны во время и после воздействия длительной ЧЭССМ в сочетании со слабым по величине мышечным напряжением

Опираясь на высказывания авторов, мы предполагаем, что при воздействии длительной ЧЭССМ [1] в покое последовательно вовлекаются восходящие периферические влияния от Ia [2], [3] и Ib [4], [5] афферентов на  $\alpha$ -мотонейроны, а также возбуждающие супраспинальные входы (кортико- [6], вестибуло- [7], ретикулоспинальные [8]) на соответствующие мотонейроны, что приводит к усилению нерцепрокных облегчающих влияний на мотонейронный пул мышц-агонистов голени (*m. soleus* и *m. gastrocnemius*) (рис. 6).

Собственные результаты исследований указывают на то, что на фоне длительной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга [1] и выполнения слабого по величине статического усилия [12] проявлялось наиболее выраженное нерцепрокное торможение  $\alpha$ -мотонейронов *m. soleus*, которое сохранялось в течение 10 минут последствия (рис. 6).

Учитывая то, что кортикоспинальные волокна оказывают возбуждающие влияния на интернейроны Ib [9] нерцепрокного торможения при произвольном мышечном сокращении (M. Knikou, 2008; E. Pierrot-Deseilligny, D. Burke, 2012), можно предположить, что длительная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга [1] в сочетании со слабым по величине статическим усилием [12] и ее постактивационный эффект дополнительно активируют возбуждающие кортикоспинальные пути [6] и периферические влияния Ib афферентов от рецепторов Гольджи [4], усиливая функциональную активность тормозных интернейронов Ib [9] нерцепрокного торможения. Проявление нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов мышц-агонистов голени может регулироваться механизмами возвратного торможения через клетку Реншоу [10] и пресинаптического торможения, опосредованного Ia афферентами на соответствующие интернейроны [11] (A. Rossi, B. Decchi, 1997; А.А. Челноков и др., 2015-2017) (рис. 6).

Таким образом, можно утверждать, что длительная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга модулирует нерцепрокное торможение спинальных  $\alpha$ -мотонейронов, которое обеспечивает оптимальное функционирование поддержания напряженности скелетных мышц и развиваемой ими силы, а также степени растягивающего усилия.

На основании результатов исследования о влиянии длительной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние моторной системы человека нами предложен новый методический подход к повышению мышечной силы посредством электростимуляционного воздействия на спинной мозг. Предлагаемый подход может быть использован как дополнительное средство тренировочного воздействия на моторную систему спортсменов в тех видах спорта, результат в которых зависит от силовых способностей.

## ВЫВОДЫ

1. Увеличение силы и частоты ритмической электрической стимуляции мышц вызывает более выраженное повышение моментов мышечных сил по сравнению с электромагнитной стимуляцией. Так, при использовании электрической стимуляции максимальной интенсивности момент сил увеличился на 375,75% ( $P < 0,05$ ) по сравнению с исходным уровнем и на 185,51% ( $P < 0,05$ ) – по сравнению с электромагнитным воздействием.

2. Повышение интенсивности однократного электрического воздействия на спинной мозг приводит к увеличению амплитуды и укорочению латентного периода вызванных моторных ответов мышц голени, что указывает на последовательную активацию  $\alpha$ -мотонейронных пулов, связанных с быстрыми мышечными волокнами, по мере возрастания силы электрической стимуляции.

3. Латентный период М-ответа *m. soleus* при увеличении силы электрической стимуляции на *n. tibialis* укорачивается в среднем по группе на 1,92 мс ( $P < 0,05$ ). Этот факт, вероятно, отражает рекрутирование эфферентных нервных волокон всё большего диаметра, иннервирующих быстрые мышечные волокна типа ПА и ПАВ.

4. Электрическая стимуляция поясничного утолщения спинного мозга, осуществляемая в течение 20 минут, приводит к повышению силовых возможностей мышц голени, что проявляется в увеличении максимального момента сил на 13,67% по сравнению с исходным уровнем ( $P < 0,05$ ).

5. Повышение силовых возможностей мышц голени, вызываемое длительной электрической стимуляцией спинного мозга в состоянии покоя, сопровождается увеличением амплитуды электромиографической активности

мышц при реализации максимального усилия. Этот факт свидетельствует о формировании моторной команды, обеспечивающей рекрутирование дополнительного количества двигательных единиц рабочих мышц.

6. Амплитуда мышечных ответов, вызванных транскраниальной электромагнитной стимуляцией, увеличивается под влиянием длительного электрического воздействия на спинной мозг, что указывает на повышение возбудимости моторной зоны коры головного мозга.

7. Нерцепрокное торможение  $\alpha$ -мотонейронов мышц голени может регулироваться длительной электрической стимуляцией спинного мозга. Электрическая стимуляция спинных структур мозга, проводимая в течение 20 минут в состоянии относительного мышечного покоя, оказывает нерцепрокное облегчающее влияние на  $\alpha$ -мотонейроны спинного мозга, а в сочетании со слабым мышечным напряжением способствует усилению нерцепрокного торможения.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК, Scopus**

1. **Рощина, Л.В.** Влияние длительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры вызванных мышечных ответов человека / Л.В. Рощина, В.В. Маркевич, С.М. Иванов, Р.М. Городничев, А.А. Челноков // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2018. – № 2. – С. 121-128. **(ВАК)**

2. **Рощина, Л.В.** Эффект длительной электрической стимуляции спинного мозга на проявления нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц человека / Л.В. Рощина, Д.А. Гладченко, Е.А. Пивоварова, А.А. Челноков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. – 2019. – Том 23, № 4. – С. 390-396. **(ВАК)**

3. **Рощина, Л.В.** Эффект чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние моторной системы человека / Л.В. Рощина, А.А. Челноков // Теория и практика физической культуры. – 2020. – № 4 (982). – С. 30. **(Scopus)**

4. Богданов, С.М. Эффект супраспинальных влияний на проявление пресинаптического торможения Ia афферентов при разных типах мышечного сокращения у человека / С.М. Богданов, Д.А. Гладченко, **Л.В. Рощина**, А.А. Челноков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина. – 2020. – Том 24, № 4. – С. 339-345. **(ВАК)**

## Материалы в журналах и сборниках конференций

1. Городничев, Р.М. Эффекты электрической и электромагнитной стимуляции спинного мозга на моторную систему человека / Р.М. Городничев, А.М. Пухов, И.В. Пискунов, Е.А. Пивоварова, **Л.В. Рощина**, В.Н. Шляхтов // Материалы XXIII съезда Физиологического общества имени И.П. Павлова. Воронеж, Россия; 18-22 сентября 2017 г. – Воронеж: Изд-во «Истоки». – 2017. – С. 1614-1615.

2. **Рощина, Л.В.** Использование чрескожной электрической стимуляции спинного мозга для повышения силовых возможностей скелетных мышц голени / Л.В. Рощина, А.А. Челноков // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Проблемы физической культуры населения, проживающего в условиях неблагоприятных факторов окружающей среды». Гомель, республика Беларусь; 5-6 октября 2017 г. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины. – 2017. – Часть 1. – С. 253-256.

3. **Рощина, Л.В.** Применение чрескожной электрической стимуляции спинного мозга для повышения силовых возможностей скелетных мышц голени / Л.В. Рощина, А.А. Челноков // Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции «Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития». Казань, Россия; 11 октября 2017 г. – Sterlitamak: АМИ. – 2017. – С. 4-8.

4. Челноков, А.А. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга как метод повышения силовых возможностей скелетных мышц голени / А.А. Челноков, **Л.В. Рощина** // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные методы организации тренировочного процесса, оценки функционального состояния и восстановления спортсменов». Челябинск, Россия; 24-25 октября 2017 г. / под ред. д.м.н. проф. Е.В. Быкова. – Челябинск: УралГУФК. – 2017. – Том 1. – С.334-337.

5. Городничев, Р.М. Стимуляционные воздействия на ЦНС как средство изменения координационной структуры локомоторных движений / Р.М. Городничев, С.А. Моисеев, Е.А. Пивоварова, А.М. Пухов, С.М. Иванов, В.В. Маркевич, **Л.В. Рощина** // Материалы V Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте». Москва, Россия; 23-24 ноября 2017 г. / Рос. гос. акад. физ. культуры, спорта и туризма, Моск. гос. акад. физ. культуры; ред.-сост. А.Н. Фураев. – Москва; Малаховка. – 2017. – С. 23-29.

6. **Рощина, Л.В.** Эффект длительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры

вызванных мышечных ответов человека / Л.В. Рощина, В.В. Маркевич, А.А. Челноков // Материалы Международного научно-практического конгресса, посвященного 100-летию ГЦОЛИФК «Научно-педагогические школы в сфере физической культуры и спорта». Москва, Россия; 30-31 мая 2018 г. – Москва: РГУФКСМиТ. – 2018. – С. 265-268.

7. **Рощина, Л.В.** Влияние длительной электрической и кратковременной электромагнитной стимуляции спинного мозга на параметры вызванных мышечных ответов человека / Рощина Л.В., Маркевич В.В., Челноков А.А. // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации». Краснодар, Россия; 28-30 ноября 2018 г. / ред. коллегия: С.М. Ахметов, Г.Д. Алексянц, Г.Б. Горская, Е.М. Бердичевская, Е.А. Пархоменко. – Краснодар: КГУФКСТ. – 2018. – С. 346-348.

8. Гладченко, Д.А. Влияние электрической стимуляции спинного мозга на ЭМГ-паттерны шагательных движений при разной мощности афферентации от опорно-двигательного аппарата / Д.А. Гладченко, А.А. Челноков, **Л.В. Рощина** // Материалы IX Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности, посвящённой памяти Е.Е. Никольского «Новые подходы к изучению классических проблем». Москва, Россия; 18-21 марта 2019 г. / под общ. ред. И.Б. Козловской, О.Л. Виноградовой, Б.С. Шенкмана. – Москва: ГНЦ РФ – ИМБП РАН. – 2019. – С. 44.

9. Гладченко, Д.А. Влияние неинвазивной электрической стимуляции спинного мозга на изменения кинематических параметров шагательного паттерна при различной мощности афферентации от опорно-двигательного аппарата / Д.А. Гладченко, **Л.В. Рощина**, Е.А. Пивоварова, А.А. Челноков // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации». Краснодар, Россия; 29-30 ноября 2019 г. / ред. коллегия: С.М. Ахметов, Г.Д. Алексянц, Г.Б. Горская, Е.М. Бердичевская, Е.А. Пархоменко. – Краснодар: КГУФКСТ. – 2019. – С. 85-87.

10. **Рощина, Л.В.** Влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на проявления нерцепторного торможения  $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц человека / Л.В. Рощина, Е.А. Пивоварова, Д.А. Гладченко, А.А. Челноков // Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации». Краснодар, Россия; 29-30 ноября

2019 г. / ред. коллегия: С.М. Ахметов, Г.Д. Алексанянц, Г.Б. Горская, Е.М. Бердичевская, Е.А. Пархоменко. – Краснодар: КГУФКСТ. – 2019. – С. 305-307.

11. **Рощина, Л.В.** Сравнительный анализ изменения мышечной силы под воздействием электрической и электромагнитной стимуляции скелетной мышцы человека аппарата / Л.В. Рощина // Сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, Россия; 15 февраля 2020 г. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2020. – С. 46-48.

12. **Рощина, Л.В.** Особенности функционального состояния нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов мышц-агонистов голени человека под влиянием длительной электрической стимуляции спинного мозга / Л.В. Рощина, А.А. Челноков // Сборник статей XXXI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, Россия; 15 февраля 2020 г. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2020. – С. 49-51.

13. **Рощина, Л.В.** Сравнительный анализ параметров вызванных моторных ответов скелетных мышц человека при электрическом воздействии на спинной мозг и периферический нерв / Л.В. Рощина, А.А. Челноков // Сборник статей по материалам XXX Международной научно-практической конференции «Научный форум: Медицина, биология и химия». Москва, Россия; февраль 2020 г. – Москва: Изд. «МЦНО». – 2020. – № 2 (30). – С. 12-17.

14. **Рощина, Л.В.** Влияние длительной электрической стимуляции спинного мозга на функциональное состояние нерцепрокного торможения  $\alpha$ -мотонейронов мышц голени человека / Л.В. Рощина, Д.А. Гладченко, А.А. Челноков // Межрегиональный сборник научных трудов по проблемам интегративной и спортивной антропологии, посвященный памяти доктора медицинских наук, профессора Р.Н. Дорохова (Выпуск 16) «Дети, спорт, здоровье». Смоленск, Россия; 2020 г. / под общ. ред. к.п.н., доцента О.М. Бубненко. – Смоленск: СГАФКСТ, 2020. – С. 179-182.

15. **Рощина, Л.В.** Использование электрической стимуляции скелетных мышц и спинного мозга в спортивной практике / Л.В. Рощина Л.В., А.А. Челноков // Материалы X Юбилейной международной научно-практической конференции «Физическое воспитание, спорт, физическая реабилитация и рекреация: проблемы и перспективы развития». Красноярск, Россия; 1 июня 2020 г. / под общ. ред. Т.Г. Арутюняна. – СибГУ им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2020. – С. 129-134.

16. Богданов, С.М. Эффект супраспинальных влияний на проявление

пресинаптического торможения Ia афферентов при разных типах мышечного сокращения у человека/ С.М. Богданов, Д.А. Гладченко, **Л.В. Рощина**, А.А. Челноков // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Физиология человека». Чебоксары, Россия; 2020 г. / под ред. Е.В. Саперовой. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2020. – С. 32-36.

17. **Рощина, Л.В.** Эффект длительной электрической стимуляции спинного мозга на силовые возможности и проявление нерцепторного торможения  $\alpha$ -мотонейронов скелетных мышц / Л.В. Рощина, Д.А. Гладченко, Е.А. Пивоварова, А.А. Челноков // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Физиология человека». Чебоксары, Россия; 2020 г. / под ред. Е.В. Саперовой. – Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2020. – С.154-159.

18. Гладченко, Д.А. Влияние приёма Ендрассика и решения арифметических задач на активность пресинаптического торможения афферентов Ia при выполнении изометрического сокращения / Д.А. Гладченко, **Л.В. Рощина**, Е.А. Пивоварова, А.А. Челноков // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации». Краснодар, Россия; 11-12 декабря 2020 г. / ред. коллегия: С.М. Ахметов, Г.Д. Алексанянц, Г.Б. Горская, Е.М. Бердичевская, Е.А. Пархоменко – Краснодар: КГУФКСТ, 2020. – С. 186-188.

19. Челноков, А.А. Особенности пресинаптического торможения при разных типах мышечного сокращения у лиц, занимающихся физической культурой и спортом / А.А. Челноков, Д.А. Гладченко, С.М. Богданов, **Л.В. Рощина** // Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Ресурсы конкурентоспособности спортсменов: теория и практика реализации». Краснодар, Россия; 11-12 декабря 2020 г. / ред. коллегия: С.М. Ахметов, Г.Д. Алексанянц, Г.Б. Горская, Е.М. Бердичевская, Е.А. Пархоменко – Краснодар: КГУФКСТ, 2020. – С. 214-216.



## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

A (mA) – ампер (миллиампер)

V (mV,  $\mu$ V) – вольт (милливольт, микровольт)

ВМО – вызванный мышечный ответ

Гц – герц

ММС – момент мышечных сил

M-ответ – суммарный ответ мышцы на стимуляцию

МПС – максимальное произвольное сокращение

Н·м – ньютон-метр

с (мс) – секунда (миллисекунда)

ТМС – транскраниальная магнитная стимуляция

ЧЭССМ – чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга

ЭМГ – электромиограмма (электромиография)

ЭМГ-активность – электромиографическая активность

BF – m. biceps femoris

GM – m. gastrocnemius med.

RF – m. rectus femoris

SOL – m. soleus

TA – m. tibialis anterior