

На правах рукописи



Барканов Максим Геннадьевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ НЕРВНО-МЫШЕЧНОГО АППАРАТА СПОРТСМЕНОВ-
ЛЕГКОАТЛЕТОВ В ПРОЦЕССЕ ЧРЕСКОЖНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СТИМУЛЯЦИИ РАЗНЫХ ЗОН СПИННОГО МОЗГА**

1.5.5. Физиология человека и животных

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Майкоп – 2025

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

Научный руководитель – Челноков Андрей Алексеевич,
доктор биологических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта»,
заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин (г. Великие Луки).

Официальные оппоненты: Корягина Юлия Владиславовна
доктор биологических наук, профессор,
руководитель центра медико-биологических технологий ФГБУ СКФНКЦ ФМБА России (г. Ессентуки, Россия)

Мельников Андрей Александрович
доктор биологических наук, профессор,
заведующий кафедрой физиологии РУС «ГЦОЛИФК» (г. Москва, Россия).

Ведущая организация : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный университет»

Защита состоится 26 февраля 2026 г. в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.267.02 при ФГБОУ ВО «Адыгейский государственный университет» по адресу: 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Пионерская, 260, конференц-зал научной библиотеки АГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Д. А. Ашхамафа ФГБОУ ВО «Адыгейский государственный университет» по адресу: 385000, Республика Адыгея, г. Майкоп, ул. Пионерская, 260, и на сайте университета

<https://www.adygnet.ru/nauka/aspirantura-doktorantura-dissertatsionnye-sovety/dissertation/7404/>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2025 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук, доцент



Кузмин
Андрей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Проблема поиска нетрадиционных методов тренировки для развития ведущих физических качеств (скоростно-силовые и частоту движений, межмышечную координацию, скоростную выносливость) и способностей спортсменов является одной из наиболее актуальных в спортивной физиологии и медицине, особенно в условиях антидопингового контроля. Это обусловлено тем, что подобные методы позволяют раскрывать резервы организма без применения запрещённых анаболических средств, воздействуя на естественные механизмы нейромышечной регуляции (Pugh, Pugh, 2021; Oleksak et al., 2024). В качестве одного из таких перспективных методов рассматривается чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга (ЧЭССМ). Многочисленные экспериментальные исследования последних лет убедительно демонстрируют, что селективная и мультисегментарная ЧЭССМ, направленная на активацию локомоторных генераторов спинного мозга, способствует нейромодуляции моторных функций и повышает двигательные способности. Так, селективная стимуляция в зоне нижнегрудных позвонков приводит к повышению мышечной силы и функциональным изменениям в НМА у здоровых людей (Рощина, Челноков, 2020; Рощина, 2021). Мультисегментарная стимуляция в зонах нижнегрудных и верхнепоясничных позвонков, в свою очередь, повышает скоростно-силовые способности у спортсменов (Городничев и др., 2013; Городничев, Шляхтов, 2016, 2022; Ivanov et al., 2024) и приводит к увеличению амплитуды маховых движений, улучшению межмышечной координации и оптимизации временных параметров опорно-полётных фаз во время бега (Михайлова, 2015; Михайлова, Барканов, 2018). Однако вопрос о возможности применения неинвазивного электростимуляционного воздействия разных зон спинного мозга как отдельно, так и совместно, в спортивной физиологии остаётся открытым. Наконец, не раскрыта научная проблема о закономерных изменениях, вызванных электростимуляцией разных зон спинного мозга, в функциональном состоянии НМА спортсменов-легкоатлетов в физиологическом покое и условиях стереотипных скоростных движений, характеризующихся сложной координацией и проявлением больших мышечных усилий.

Степень разработанности темы исследования. Неинвазивный способ воздействия на нейрональные структуры спинного мозга с помощью чрескожной электрической стимуляции был предложен сравнительно недавно (Герасименко и др., 2010; Городничев и др., 2012; Minassian et al., 2007; Courtine et al., 2007). В настоящее время неинвазивная ЧЭССМ является эффективным методом в изучении спинальных механизмов регуляции локомоций у здоровых людей и пациентов с поражениями центральной нервной системы (Герасименко и др., 2010-2023; Городничев и др., 2012-2023). ЧЭССМ нашла своё практическое применение и является одним из информативных методов интраоперационного нейрофизиологического

мониторинга при оценке возбудимости двигательных нейронов, целостности двигательных корешков и периферических нервов нижних конечностей у пациентов (Minassian et al., 2020; Choi et al., 2024), а также в двигательной реабилитации (Баиндурашвили и др., 2018; Савенкова и др., 2019; Жарова и др., 2023; Корчемкин и др., 2023; Megía García et al., 2020; Novikov et al., 2024). Стратегия неинвазивного метода стимуляции спинного мозга основана на нейромодуляции моторных функций человека (Герасименко, 2021, 2023). К настоящему времени накоплены экспериментальные данные об активации локомоторных генераторов с помощью селективной и мультисегментарной стимуляции (Герасименко, 2002; Мошонкина, 2017; Гладченко, 2018; Моисеев и др., 2018), показана возможность использования искусственного раздражения нейронных сетей спинного мозга для управления спинальными нейрональными структурами (Wagner et al., 2018), исследована нейромодуляция тормозных интернейронных сетей в системе мышц-антагонистов и синергистов голени у здоровых людей (Челноков и др., 2022; Gladchenko et al., 2022) и пациентов со спинальной спастичностью (Minassian et al., 2024), изучены особенности синергетических взаимодействий скелетных мышц нижних конечностей (Моисеев, Городничев, 2023; Моисеев, 2023).

Большинство последних работ по локомоции человека направлены на анализ нейрофизиологических и биомеханических параметров нормальной ходьбы и бега ведущей конечности, обычно, правой (Городничев и др., 2021; Моисеев и др., 2022; Моисеев, 2023; Гладченко и др., 2024). В ограниченном числе исследований освещаются вопросы, связанные с динамикой функциональной межмышечной асимметрии в симметричных мышцах голени, особенностями их афферентного обеспечения в процессе ходьбы (Liang et al., 2016; Gervasio et al., 2017), а также проявлениями функциональной двигательной асимметрии в условиях спортивной деятельности (Бердичевская, Гронская, 2009; Чермит и др., 2022, 2024). Следует отметить, что в работах по исследованию влияния ЧЭССМ на активность спинальных нейронных локомоторных сетей в процессе реализации естественных двигательных действий эксперименты проводились на здоровых спортсменах, выполняющих обычную произвольную ходьбу в удобном для них темпе, характеризующейся несложной координацией движений и незначительными по величине усилиями мышц (Барканов, Городничев, 2022).

Цель исследования: обосновать закономерности изменения функционального состояния нервно-мышечного аппарата спортсменов-легкоатлетов в процессе чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга.

Задачи исследования:

1. Изучить и обосновать закономерности проявления вызванных моторных ответов скелетных мышц билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов в зависимости от зоны одиночного воздействия чрескожной электрической стимуляции спинного мозга.
2. Выявить особенности постактивационного влияния ритмической

стимуляции копчикового сплетения при кратковременном её воздействии на возбудимость спинальных центров мышц-антагонистов билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов.

3. Определить электромиографические характеристики и импульсную активность первичных и вторичных афферентов скелетных мышц билатеральных нижних конечностей при скоростных циклических движениях в различные фазы (опора и перенос) бегового шага у спортсменов-легкоатлетов без стимуляционного воздействия на спинной мозг.

4. Изучить особенности нейромодулятивного влияния мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в зонах T_{11} - T_{12} в фазу переноса и L_1 - L_2 в фазу опоры, селективной ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения на уровне Co_1 - Co_2 и мультисегментарной стимуляции в различные фазы движения совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения на электромиографические характеристики и импульсную активность афферентов скелетных мышц билатеральных нижних конечностей в зависимости от фазы скоростного бегового шага у спортсменов-легкоатлетов.

5. Обосновать закономерности изменения функционального состояния НМА (по данным электромиографических показателей) при скоростных локомоторных движениях в процессе чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга, а также их влияние на повышение скоростных способностей (по данным кинематических показателей) у спортсменов-легкоатлетов.

Научная новизна работы. С использованием комплексного нейрофизиологического подхода в работе впервые:

– установлены особенности амплитудных характеристик вызываемых моторных ответов скелетных мышц билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов в ответ на чрескожную электрическую стимуляцию в зонах нижнегрудных T_{11} - T_{12} , верхнепоясничных L_1 - L_2 позвонков и копчикового сплетения на уровне Co_1 - Co_2 позвоночника;

– выявлено, что кратковременная 10- и 60-секундная ритмическая электрическая стимуляция копчикового сплетения в области Co_1 - Co_2 у спортсменов-легкоатлетов приводит к разнонаправленным изменениям в возбудимости спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей, вызываемых однократной электрической стимуляцией в области T_{11} - T_{12} позвонков, но среднем по группе спортсменов её постактивационное воздействие оказывает преимущественно облегчающие влияния на мотонейронные пулы спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей;

– определены перекрёстные внутримышечные ЭМГ-паттерны напряжения и расслабления мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей при скоростных циклических движениях у спортсменов-легкоатлетов, зависящие от фазы движения, а также специфическая внутримышечная афферентная активность (сильная импульсная активность

афферентов Ib экстензоров и флексоров голени, умеренная – афферентов II и слабая – Ia афферентов), разнонаправленная межмышечная афферентация и перекрёстные афферентные взаимодействия гомологичных мышц голени билатеральных конечностей в разные фазы скоростного движения;

– показано, что в процессе неинвазивного электрического воздействия разных зон спинного мозга при реализации скоростного локомоторного движения происходит закономерная фазозависимая нейромодуляция нервно-мышечных структур опорно-двигательного аппарата спортсменов-легкоатлетов. Показано, что чрескожная стимуляция разных зон спинного мозга приводит к закономерным разнонаправленным изменениям в биоэлектрической активности рабочих мышц, внутри- и межмышечной координации, реципрокных, синергетических отношениях и активности проприоцептивных афферентных входов к мотонейронным пулам дистальных мышц-антагонистов билатеральных нижних конечностей в определённые фазы бегового шага;

– описаны закономерные изменения, вызванные электростимуляцией разных зон спинного мозга при скоростных локомоторных движениях, сопровождающиеся более выраженным повышением амплитуды ЭМГ экстензора бедра в фазах опоры правой и переносе левой конечностей, флексора голени в фазе переноса правой и левой конечностей, импульсной активности афферентных Ia, Ib, II волокон флексора стопы при переносе левой конечности при мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в зонах T₁₁-T₁₂ в фазу переноса и L₁-L₂ позвонков в фазу опоры бегового шага совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂ позвоночника, а также темпа бега, скорости и ускорения антропометрических точек, что свидетельствует о повышении скоростных способностей у спортсменов-легкоатлетов.

Теоретическая значимость работы. Полученные в исследовании новые факты о закономерностях изменения функционального состояния НМА спортсменов-легкоатлетов в процессе чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга вносят существенный вклад в теории многоуровневой организации движений и управления движениями, расширяют концептуальные подходы функционирования двигательной системы человека при спортивной деятельности и адаптация организма к физическим нагрузкам. Установленные данные значительно углубляют и дополняют современную информационно-методологическую базу для комплексной оценки регуляторно-адаптивного статуса и резервных возможностей НМА спортсменов в процессе чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга, открывая новые перспективы для диагностики уровня тренированности и прогнозирования спортивных результатов.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методика трёхуровневой неинвазивной мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в различные фазы движения совместно с ритмической электрической стимуляцией

копчикового сплетения может использоваться в качестве дополнительного средства целенаправленной регуляции локомоторных движений. Установлена эффективность кратковременной 10-секундной мультисегментарной стимуляции спинного мозга в различные фазы движения совместно со стимуляцией копчикового сплетения при скоростном беге, проявляющаяся наибольшими приростами темпа бега, дистанции, скорости и ускорений антропометрических точек движений конечностей у спортсменов-легкоатлетов. Апробированная методика регистрации вызванных моторных ответов билатеральных нижних конечностей при однократной неинвазивной электрической стимуляции копчикового сплетения в области S_0 - S_2 позвоночника может быть полезна для тестирования пациентов с дисфункциями и заболеваниями спинного мозга, использоваться в качестве интраоперационного нейрофизиологического мониторинга, а также может быть применима в изучении нейрофизиологических рефлекторных механизмов, обеспечивающих движения у человека. Данные о направленности изменений амплитуд вызванных моторных ответов билатеральных нижних конечностей при стимуляции копчикового сплетения и их индивидуальные особенности у спортсменов-легкоатлетов могут являться нормативной базой в спортивной медицине для разработки рекомендаций по направленной коррекции рефлекторных механизмов на спинальном уровне в тренировочном процессе, а предложенные методики чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга могут быть включены в содержание соответствующих разделов при написании методических и справочных рекомендаций по клинической электронейромиографии.

Предложенные в работе практические рекомендации и методы возможно использовать в качестве основы для проведения в соответствующих научных лабораториях дальнейших исследований физиологических механизмов неинвазивного электрического воздействия на функциональное состояние нейрональных структур центральной нервной системы и мышечного аппарата у квалифицированных спортсменов различных специализаций, а также в изучении бинарного взаимодействия «симметрии и асимметрии» координационных соотношений мышц нижних конечностей в цикле бегового шага.

Результатов диссертационной работы используются в лекционных курсах ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта» при преподавании дисциплинам: «Методология научно-исследовательской деятельности в физической культуре», «Современные методы научных исследований и проектной деятельности в области физической культуры и спорта» образовательной программы направления подготовки 49.04.01 «Физическая культура»; «Возрастные физиологические основы подготовки спортивного резерва», «Физиологические основы подготовки спортсменов», «Электрофизиологические методы тестирования в спорте» образовательной программы направления подготовки 49.04.03 «Спорт»; «Физиология» и «Возрастная физиология» образовательной программы по

научной специальности 1.5.5 Физиология человека и животных.

Теоретико-методологическая основа исследования. Теоретической и методологической основой исследований являются классические и современные представления о нейрофизиологических и биомеханических механизмах регуляции локомоторных движений (Бернштейн, 1947; Персон, 1965; Шик, Орловский, Северин, 1966; Батуев, Таиров, 1978; Баев, 1983, 1991; Витензон, 1998; Гурфинкель и др., 1998; Герасименко, 2002; Pierrot-Deseilligny, Burke, 2012; Аршавский и др., 2015 и др.), афферентного контроля произвольных движений (Козловская, 1976; Stein, 1978; Orlovsky et al., 1999; Prochazka, Gorassini, 1998; Rossignol, 1996, 2006), рефлекторных возбуждающих и тормозных феноменов, связанных с взаимодействием различных афферентных входов на интернейрональный аппарат спинного мозга в контроле локомоторных движений (Sherrington, 1910; Сафьянц, 1976; Плещинский, Алексеева, 1996; Pierrot-Deseilligny, Burke, 2012; Jankowska, 2016a,b), стратегии нейромодуляции локомоторных функций человека неинвазивным методом стимуляции спинного мозга (Городничев и др., 2012-2023; Герасименко и др., 2017; Герасименко, 2021, 2023; Dimitrijevic et al., 1998; Minassian et al., 2007, 2024; Courtine et al., 2007; Sabbahi et al., 2011-2013; Gerasimenko et al., 2010, 2015), подходах использования неинвазивной методики стимуляции спинного мозга для повышения силы и скоростно-силовых способностей у спортсменов (Городничев и др., 2013; Городничев, Шляхтов, 2016, 2022; Рощина, Челноков, 2020; Рощина, 2021; Ivanov et al., 2024).

В работе применялись методы поверхностной и стимуляционной электромиографии, кинематический анализ движений конечностей, математическое моделирование импульсной активности первичных и вторичных афферентов скелетных мышц, основанное на прогнозировании срабатывания мышечных веретен. Использовались оригинальные методы мультисегментарной ЧЭССМ, опубликованные в работах Городничева с коллегами (2021) и Барканова, Городничева (2022). Анализ полученных данных осуществлялся в современном программном обеспечении и на основе обычно применяемых математико-статистических подходов, описанных в пособиях (Гланц, 1999; Кожевников, 2018).

Методологическую основу исследования составили: комплексный подход к организации исследования, учения о двигательной активности как феномена кинезиологического потенциала человека в онтогенезе, теории и методики спортивной тренировки в легкой атлетике, системно сформированные современные представления о нейрофизиологических и биомеханических механизмах регуляции локомоторных движений.

Организация и методы исследования. Исследование проводилось на базе НИИ проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «ВЛГАФК» в период с 2020 по 2025 года. В исследованиях принимали участие спортсмены мужского пола, специализирующиеся в беге на короткие дистанции (средний возраст $20,62 \pm 0,22$ лет; масса тела – $69,85 \pm 1,31$ кг;

квалификация от II взрослого разряда до кандидата в мастера спорта). Суммарный объем выборки всех экспериментов составил 53 спортсмена. Для уменьшения влияния эффекта тренировок на результаты исследований, эксперименты проводились в переходный период, когда интенсивность тренировочного воздействия на спортсменов снижена.

В рамках исследований со всех испытуемых было получено информированное согласие на участие в экспериментах в соответствии с Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации (WMA Declaration of Helsinki – Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects, 2013), а также получено разрешение на обработку персональных данных.

Исходя из задач диссертационной работы, были использованы следующие методы исследования: 1) методы ЧЭССМ; 2) методы электромиографии (поверхностная и стимуляционная); 3) методы математического моделирования импульсной активности первичных и вторичных афферентов скелетных мышц; 4) методы кинематики; 5) методы математико-статистической обработки.

I серия экспериментов была посвящена изучению особенностей ВМО скелетных мышц билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов в зависимости от зоны воздействия ЧЭССМ. В первой части исследования у 12 спортсменов в возрасте 18-27 лет ($20,75 \pm 0,76$ лет; КМС, I и II разряды) оценивалась амплитуда ВМО мышц-антагонистов бедра и голени при максимальной одиночной силе стимула (90 мА), наносимого по средней линии в области грудных T₁₁-T₁₂ позвонков, во второй части у 5 спортсменов в возрасте 18-19 лет ($18,80 \pm 0,14$ лет; КМС, I и II разряды) оценивался тот же показатель, инициируемый стимуляцией по средней линии в области поясничных L₁-L₂ позвонков и в третьей части – у 9 спортсменов в возрасте 18-27 лет ($20,75 \pm 0,64$ лет; КМС, I и II разряды), по средней линии копчикового сплетения Co₁-Co₂ (при аналогичной силе стимула). Регистрация ВМО билатеральных мышц (RF, BF, TA, GM) осуществлялась в положении лёжа на кушетке лицом вниз в состоянии покоя с помощью электронейромиографа «Нейро МВП-8» (ООО «Нейрософт», Россия). Протокол исследования включал для каждого испытуемого по 3 стимуляции в каждой зоне СМ с паузами между подаваемыми импульсами не менее 15 секунд.

II серия экспериментов направлена на изучение особенностей постактивационного эффекта рЭС копчикового сплетения разной продолжительности воздействия на возбудимость спинальных центров билатеральных мышц-антагонистов бедра и голени у спортсменов-легкоатлетов. В данной части исследования у 9 спортсменов мужского пола в возрасте 18-27 лет ($21,44 \pm 1,01$ лет; КМС, I и II разряды) оценивалось влияние 10- и 60-секундной рЭС в области копчикового сплетения Co₁-Co₂ (стимулятор БиоСтим-5, ООО «Косима», Россия; импульсы прямоугольной формы, частота следования импульсов – 30 Гц, длительность импульсов – 0,5 мс, прямоугольные импульсы заполнялись несущей частотой 10 кГц) на

возбудимость спинальных центров мышц нижних конечностей, вызываемых одиночной силой стимула (90 мА; электронейромиограф «Нейро МВП-8», ООО «Нейрософт», Россия) на уровне грудных T₁₁-T₁₂ позвонков, в положении лёжа на кушетке лицом вниз. У каждого испытуемого регистрировали ВМО флексоров/экстензоров правой и левой конечностей до рЭС копчикового сплетения (контрольный стимул или контроль) и сразу после неё (тестирующий стимул или тестирование). Проводили 3 пары (контроль-тестирование) стимуляций для каждого испытуемого. Для предотвращения следовых эффектов воздействия стимуляции и полного восстановления возбудимости спинальных МН мышц нижних конечностей у испытуемых учитывали интервал отдыха между контрольной и тестирующей стимуляциями, который составлял 15 секунд, а между каждой парой (контроль-тестирование) стимуляций – 10 минут.

III серия экспериментов была нацелена на изучение особенностей электромиографических параметров скелетных мышц билатеральных нижних конечностей и кинематических характеристик скоростных локомоторных движений у спортсменов-легкоатлетов без и под воздействием чрескожной электрической стимуляции разных зон СМ. В исследовании приняли участие 9 спортсменов мужского пола в возрасте 18-27 лет (21,86±1,18 лет; КМС, I и II разряды). Испытуемым выполняли локомоторный тест на беговой дорожке «Venus Saturn» (HP Cosmos, Германия), который включал проталкивание пассивной ленты тредбана в течение 10 секунд с максимально возможной скоростью, держась за поручни беговой дорожки. Для анализа бегового шага был разделён на фазу переноса – с момента отрыва нижней конечности от места опоры до момента постановки конечности на опору, и фазу опоры – с момента постановки конечности на место опоры до момента отрыва конечности от опоры (Барканов, Городничев, 2022). За 10 секунд испытуемые выполняли от 16 до 20 беговых циклов. У всех испытуемых в обработку ЭМГ-записей брали 16 беговых циклов, а при анализе кинематических параметров – от 16 до 20 беговых циклов.

Каждый спортсмен выполнял двигательный тест в 4-х экспериментальных условиях: 1. без стимуляции СМ; 2. с мультисегментарной электрической стимуляцией СМ в областях T₁₁-T₁₂ в фазу переноса и L₁-L₂ в фазу опоры бегового шага (МССМ) (Городничев и др., 2021); 3. с селективной ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения на уровне Со₁-Со₂ (СКС) (Барканов, Городничев, 2022); 4. с мультисегментарной стимуляцией в различные фазы движения совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения (МССМ+СКС) (Барканов, Городничев, 2022). Силу электрической стимуляции при каждом электрическом воздействии подбирали индивидуально для каждого испытуемого таким образом, чтобы не возникало болевых ощущений. Параметры стимуляции: импульсы прямоугольной формы, частота следования импульсов – 30 Гц, длительность импульсов – 0,5 мс, прямоугольные импульсы заполнялись несущей частотой 10 кГц для предотвращения болевых ощущений.

Для каждого экспериментального условия проводилась оценка нейрофизиологических и кинематических параметров скоростного локомоторного движения, включающая анализ:

✓ средней амплитуды ЭМГ (мкВ) мышц (VL, BF, TA, GM) билатеральных нижних конечностей. Регистрацию ЭМГ проводили с помощью телеметрического 16-канального электронейромиографа ME-6000 (Mega Electronics Ltd, Kuopio, Финляндия) в программе «MegaWin». Нормализацию, выпрямление, усреднение ЭМГ осуществляли при помощи интерактивного пакета программы MatLab 2018b (MathWorks, США);

✓ внутримышечной координации проксимальных ($VL_{\text{правая}} \times VL_{\text{левая}}$, $BF_{\text{правая}} \times BF_{\text{левая}}$)/дистальных ($TA_{\text{правая}} \times TA_{\text{левая}}$, $GM_{\text{правая}} \times GM_{\text{левая}}$) мышц и межмышечной координации экстензоров/флексоров ($VL_{\text{правая}} \times BF_{\text{правая}}$, $VL_{\text{левая}} \times BF_{\text{левая}}$, $TA_{\text{правая}} \times GM_{\text{правая}}$, $TA_{\text{левая}} \times GM_{\text{левая}}$) мышц билатеральных нижних конечностей с помощью множественного регрессионного линейного анализа (Knikou, Mummidisetty, 2014; Yaserifar, Oliveira, 2023);

✓ коэффициентов реципрокности гомонимных мышц-антагонистов (VL×BF; TA×GM) и синергии гетеронимных мышц-агонистов (VL×GM; BF×TA) билатеральных нижних конечностей (Команцев, 2006);

✓ импульсной активности первичных и вторичных афферентов мышц-антагонистов голени посредством математической модели, основанной на прогнозировании срабатывания мышечных веретен (Гладченко и др., 2024; Prochazka, Gorassini, 1998; Mileusnic, Loeb, 2009; Enoka, 2015; Gervasio et al., 2017). В основе представленных математических моделей находятся физиологические процессы, связанные с изменением длины интрафузальных мышечных волокон с ядерной цепочкой и ядерной сумкой, силы, развиваемой исследуемой мышцей, и активности мотонейронных пулов, выраженной через ЭМГ-сигналы, обработанные в программе MatLab;

✓ темпа бегового шага, дистанции, скорости и ускорения антропометрических точек билатеральных сегментов тела в 3D-пространстве. Для регистрации и обработки кинематических характеристик движений нижних конечностей использовали систему маркерного оптического захвата движений – 3D-видеозахвата «Qualisys» (Швеция). Визуализацию правой и левой стороны тела спортсмена и анализ бегового шага выполняли в среде трёхмерной графики с помощью программного обеспечения Qualisys Track Manager (QTM, Швеция).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Проявление рефлекторных моторных ответов скелетных мышц билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов закономерно зависит от зоны одиночного воздействия чрескожной электрической стимуляции спинного мозга, что обосновано различным расстоянием анатомического расположения мотонейронных пулов мышц бедра и голени в сегментах спинного мозга и зонами активации спинального участка.

2. Физиологическим обоснованием постактивационных влияний, вызываемых кратковременной ритмической электрической стимуляцией в

области копчикового сплетения, является закономерное повышение возбудимости спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей у спортсменов-легкоатлетов.

3. Скоростной бег закономерно характеризуется фазозависимой активацией мышц билатеральных нижних конечностей с реципрокными и синергетическими взаимодействиями, а также специфическими внутри-, межмышечными и перекрёстными проявлениями импульсной активности различных групп афферентов мышц-антагонистов голени билатеральных нижних конечностей.

4. Чрескожная электрическая стимуляция разных зон спинного мозга у спортсменов-легкоатлетов при реализации скоростного движения закономерно нейромодулирует функциональное состояние НМА, сопровождающееся дополнительной избирательной активацией некоторых мышц-флексоров/ экстензоров и проприорецептивных афферентных волокон билатеральных нижних конечностей в определённые фазы бегового шага.

5. В процессе мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в зонах T₁₁-T₁₂ в фазу переноса и L₁-L₂ позвонков в фазу опоры бегового шага совместно с ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂ позвоночника во время скоростного локомоторного движения спортсменами-легкоатлетами закономерно характерны более выраженные изменения в показателях функционального состояния НМА и скоростных способностей.

Степень достоверности результатов обеспечивается теоретической и методологической обоснованностью исходных позиций адекватных предмету, целям, задачам и логике исследования. Достоверность полученных результатов обеспечивалась применением методов поверхностной и стимуляционной электромиографии, кинематического анализа движений конечностей, математического моделирования импульсной активности первичных и вторичных афферентов скелетных мышц и комплекса современных статистических методов исследования. Кроме того, достоверность результатов подтверждается достаточным количеством испытуемых, объема (числа) полученных данных, применением современных методов математико-статистического анализа. Анализ полученных данных осуществлялся в современном программном обеспечении Statistica 10 (©StatSoft Inc., США), GraphPad Prism 8.0.1. (244) (©GraphPad Software, США). Вычисляли среднюю арифметическую (M), ±ошибку (SE) средней арифметической, минимальные и максимальные значения [Min-Max]. Проверку нормальности распределения переменных проводили с помощью критериев W-тест Шапиро-Уилка и Левена. Для анализа влияния нескольких независимых переменных применяли множественный линейный регрессионный анализ методом наименьших квадратов. Статистическую значимость различий между исследуемыми параметрами определяли с помощью параметрического апостериорного теста Ньюмана-Кеулса и непараметрических критериев Вилкоксона и Краскела-Уоллиса. Достоверными считали отличия при $p < 0,05$.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на: IX Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению классических проблем», посвящённой памяти Е.Е. Никольского (Москва, 2019); Международной научно-практической конференции «Физическая культура и спорт. Олимпийское образование» (Краснодар, 2020); XXIV Международном научном конгрессе «Олимпийский спорт и спорт для всех» (Казань, 2020); XXV Международном научном конгрессе «Олимпийский спорт и спорт для всех» (Минск, 2020); X Международной научной конференции студентов и молодых учёных «Университетский спорт: здоровье и процветание нации» (Омск, 2020); XIV Annual International Conference for Students and Young Researchers (Москва, 2020); 12th International Christmas Sports Scientific Conference (Hungary, Szombathely, 2020); VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте» (Москва, 2020); II Международной научно-практической конференции «Физическая культура и спорт. Олимпийское образование», (Краснодар, 2021); X Всероссийской с международным участием школы-конференции по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению проблем физиологии экстремальных состояний», посвящённой памяти И.Б. Козловской и приуроченной к году науки и технологий (Москва, 2021); I и II Открытой научно-практической конференции «Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы», посвящённой Году науки и технологий (Великие Луки, 2021, 2024); IX Российской с международным участием, конференции по управлению движением «Motor Control 2022», посвящённой 95-летию со дня рождения И.Б. Козловской (Казань, 2022); Открытой научно-практической конференции обучающихся «Вклад молодых учёных в разработку проблем физической культуры, спорта и олимпизма» (Великие Луки, 2022); Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты естественно-научного образования», посвящённой 200-летию со дня рождения К.Д. Ушинского и Году педагога и наставника (Чебоксары, 2023); III открытой научно-практической конференции, посвящённой 80-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 гг. и 55-летию ВЛГАФК (Великие Луки, 2025).

Соответствие работы паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 1.5.5. Физиология человека и животных: пункты 3, 4, 7, 9.

Публикации. По материалам диссертационного исследования опубликовано 28 научных работ, в том числе статьи в научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ – 7, из них категории 1 (K1) – 3, K2 – 3 Scopus – 5, Web of Science – 1, RSCI – 1. Публикации в полной мере отражают содержание работы и раскрывают научные положения, выносимые на защиту.

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

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из списка сокращений и условных обозначений, введения, обзора литературы, изложения общей структуры и методов исследования, результатов собственных исследований и их обсуждения, выводов, практических предложений, списка литературы и приложений. Диссертация изложена на 203 страницах печатного текста, иллюстрирована 7 таблицами и 42 рисунками. Список литературы включает 272 источника, из которых 81 – отечественные и 191 – зарубежные.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты первой серии исследований. Выраженные моторные ответы правой и левой конечностей, вызываемые однократной стимуляцией зоны грудных T₁₁-T₁₂ позвонков, характерны для мышц бедра RF (правая: $p=0,000^*$ и $p=0,000^*$; левая: $p=0,000^*$ и $p=0,000^*$) и BF (правая: $p=0,000^\#$ и $p=0,000^\#$; левая: $p=0,000^\#$ и $p=0,000^\#$) в сравнении с ТА и GM (рис. 1А). Достоверно значимых различий в амплитуде ВМО мышц бедра левой и правой конечностей не выявлено (p от 0,116 до 1,000). Однако, мышечные ответы GM правой и левой конечностей были больше на 0,48 мВ ($p=0,046$) и 0,47 мВ ($p=0,037$) по сравнению с ТА.

Мышечные ответы RF правой конечности, вызываемые стимуляцией зоны поясничных L₁-L₂ позвонков, больше в сравнении с ТА ($p=0,000^{***}$), BF правой конечности – по сравнению с ТА и GM ($p=0,019^\#$ и $p=0,000^\#$), RF и BF левой конечности – в сравнении с ТА ($p=0,000^{**}$; $p=0,012^{**}$) (рис. 1Б). Амплитуда ВМО RF правой конечности в сравнении с ответами одноименной мышцы левой конечности была больше на 0,43 мВ ($p=0,031$). В величинах амплитуд ВМО BF, ТА и GM билатеральных конечностей достоверно значимых различий не обнаружено (p от 0,426 до 0,887).

Однократная стимуляция копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂ вызывала наибольшие мышечные ответы GM билатеральных конечностей в сравнении с ТА (правая: $p=0,000^+$; левая: $p=0,002^+$), BF (правая: $p=0,000^+$; левая: $p=0,000^+$), RF (правая: $p=0,000^+$; левая: $p=0,000^+$) (рис. 1В). Амплитуды ВМО GM и BF левой конечности достоверно значимо преобладали на 0,34 мВ ($p=0,000$) и 0,14 мВ ($p=0,000$) соответственно, над показателями правой конечности. Не выявлено достоверно значимых различий в амплитудах мышечных ответов RF и ТА левой и правой конечностей ($p=0,781$; $p=0,249$). Мы полагаем, что такой модулятивный эффект может быть связан с различным расстоянием анатомического расположения мотонейронных пулов мышц бедра

и голени в сегментах СМ (RF – сегменты L₃-L₅, BF – сегменты L₅-S₂, TA – сегменты L₄-S₁, GM – сегменты S₁-S₂; Sharrard, 1964; Hofstoetter et al., 2021b; Avaltroni et al., 2024) и зонами активации спинального участка (T₁₁-T₁₂, L₁-L₂, Co₁-Co₂), при которых потенциалы действия будут распространяться по проприоспинальным путям в ростральном или каудальном направлениях к двигательным ядрам флексоров и экстензоров бедра и голени, вызывая наибольшие рефлекторные ответы мышц от близлежащих стимуляционных зон СМ.

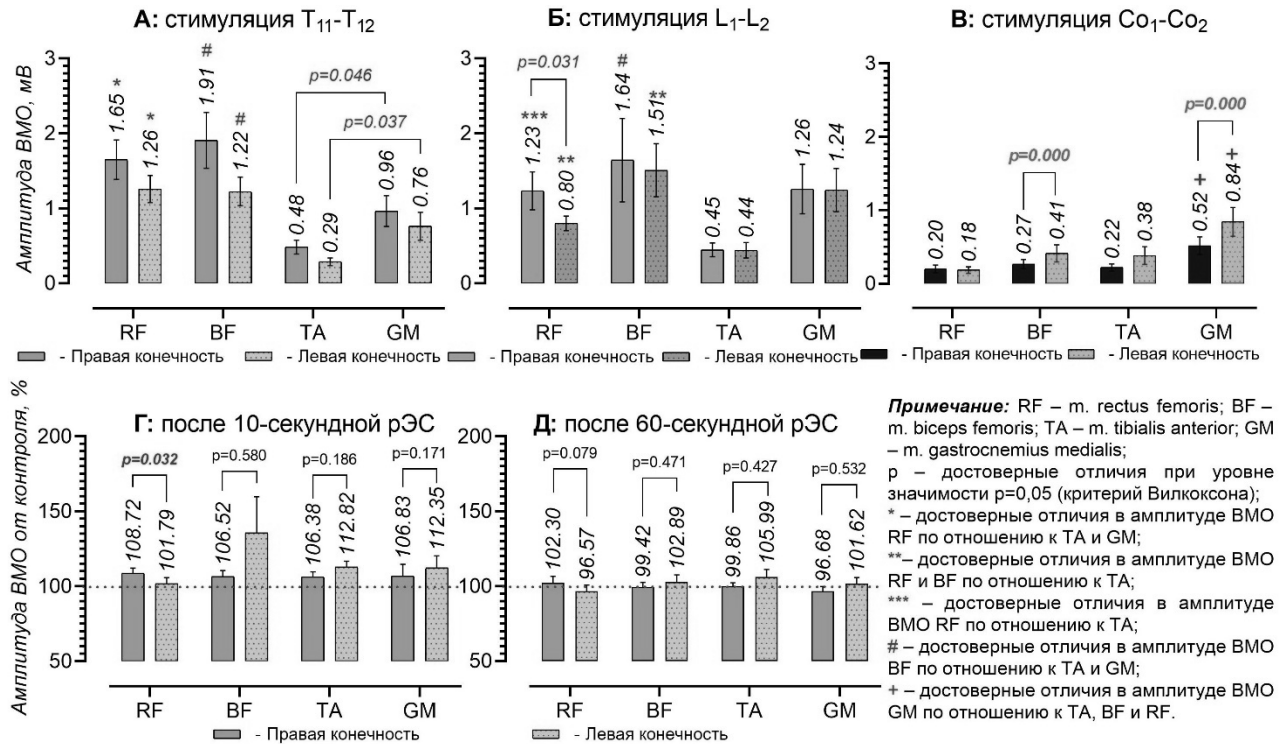


Рис. 1. А-В: Амплитуды ВМО билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов при стимуляции разных зон СМ, мВ. **Г-Д:** Средние значения облегчения и торможения амплитуд ВМО билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов после прекращения 10- и 60-секундной рЭС в области копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂, %.

Результаты второй серии исследований. Кратковременная 10- и 60-секундная рЭС копчикового сплетения у легкоатлетов приводила к разнонаправленным изменениям в возбудимости спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей, вызываемых однократной электрической стимуляцией в области T₁₁-T₁₂ позвонков: у части спортсменов возбудимость повышалась, у части – снижалась. Усреднение данных (рис. 1Г) показало, что постактивационный эффект 10-секундной рЭС сопровождался облегчением спинальных двигательных центров билатеральных нижних конечностей. Облегчение амплитуд ВМО BF, TA, GM левой конечности было больше одноименных мышц правой конечности на 29,11%, 6,44% и 5,52% соответственно, а облегчение RF правой конечности – больше на 6,93% одноименной мышцы левой конечности. При попарном сравнении выявлено только достоверно значимое превалирование облегчения ВМО правой RF над левой одноименной мышцей (p=0,032). Сравнение усреднённых

данные амплитуд ВМО бедра и голени правой и левой конечностей после прекращения 60-секундной рЭС не выявило достоверно значимых различий в облегчении и торможении (p от 0,079 до 0,532; рис. 1Д). Множественное сравнение постактивационных эффектов на амплитуды ВМО (в %) билатеральных нижних конечностей у легкоатлетов показало однонаправленные изменения в рефлекторной возбудимости спинальных α -МН бедра и голени билатеральных конечностей вне зависимости от продолжительности воздействия рЭС (p от 0,098 до 0,634). Причиной постактивационных эффектов облегчения/торможения спинальных центров мышц-антагонистов бедра и голени билатеральных конечностей, вероятно, может быть изменение свойств синапсов, локализуемых в нейрональных сетях, обеспечивающих генерирование ВМО (Столбков, Герасименко, 2021; Рощина, 2021; Барканов, Городничев, 2022; Thatcher et al., 2025) и активация спинальных интернейронных тормозных сетей: пресинаптического, реципрокного, нереципрокного, возвратного торможения (Челноков и др., 2022; Gladchenko et al., 2022; Minassian et al., 2024).

Результаты третьей серии исследований. В отсутствии стимуляции СМ скоростной беговой шаг в фазу опоры характеризуется повышением ЭМГ-активности экстензоров (VL, GM) левой и флексоров (BF, TA) правой конечностей, но уменьшением активности флексоров (BF, TA) левой и экстензоров (VL, GM) правой конечностей. В фазу переноса бегового шага ЭМГ-паттерн больше в экстензорах (VL, GM) правой и флексоре (TA) левой конечностей, и наоборот, меньше в экстензорах (VL, GM) левой и флексоре (TA) правой конечностей, при этом флексоры бедра (BF) правой и левой конечностей активны одновременно. Регрессионный анализ амплитуды ЭМГ проксимальных/дистальных мышц и экстензоров/флексоров билатеральных конечностей при скоростном беговом шаге выявил характерные внутри- и межмышечные координации в разные фазы движения. Эффективная внутримышечная координация выражается в фазе опоры бегового шага увеличением активности экстензоров бедра (VL – на 38,86%, $p=0,000$) и голени (GM – на 56,34%, $p=0,000$) левой конечности и их флексоров правой конечности (BF – на 30,04%, $p=0,012$; TA – на 36,39%, $p=0,000$), а в фазе переноса – наоборот, повышением активности экстензоров бедра (VL – на 36,11%, $p=0,002$) и голени (GM – на 80,72%, $p=0,013$) правой конечности и их флексоров (BF – на 3,45%, $p=0,0001$; TA – на 20,14%, $p=0,000$) левой конечности. Межмышечная координация проявляется в фазе опоры повышением активности флексоров бедра (BF – на 41,89%, $p=0,004$) и голени (TA – на 97,06%, $p=0,000$) правой конечности, экстензора бедра (VL – на 23,59%, $p=0,000$) левой конечности, а в фазе переноса, наоборот, экстензоров бедра (VL – на 11,87%, $p=0,000$) и голени (GM – на 27,38%, $p=0,000$) правой конечности, экстензора бедра (VL – на 16,16%, $p=0,027$) левой конечности. Реципрокность гомонимных мышц бедра (VL×BF) выражена больше в фазу опоры правой и переноса левой конечностей, гомонимных мышц голени (TA×GM) – в фазу переноса правой конечности и опорный период левой

конечности. В беговом шаге синергия гетеронимных мышц ($BF \times TA$) выражена больше в фазу опоры правой и переноса левой конечностей, а $VL \times GM$ – стабильна независимо от фазы бегового шага.

На основании полученных нами данных, можно предположить, что всю совокупность количественных сдвигов в ЭМГ-активности мышц бедра и голени билатеральных конечностей при скоростных локомоторных движениях в фазы опоры и переноса следует представить как следствие внутриспинального и рефлекторного взаимодействия, обусловленного облегчением или торможением спинальных моторных центров соответствующих мышц и опосредуемого взаимными модуляциями различных афферентных сигналов на интернейрональный аппарат СМ. Так, нами выявлена общая закономерность внутримышечных изменений в импульсной активности первичных и вторичных афферентов мышц голени вне зависимости от фазы скоростных локомоторных движений, проявляющихся сильной импульсной активностью афферентов Ib экстензоров и флексоров голени, умеренной активностью – афферентов II ($p=0,000$) и слабой – Ia афферентов ($p=0,000$; рис. 2А). Сразу акцентируем внимание, что такая закономерность внутримышечного афферентного контроля скоростного локомоторного движения выявлена при неинвазивной электрической стимуляции разных зон СМ у легкоатлетов ($p=0,000$; рис. 2Б-Д).

Выявленный факт позволяет предположить, что во время скоростного бега повышение импульсной активности Ib афферентов от сухожильных органов Гольджи в ответ на усиление сократительного эффекта мышц голени при проталкивании пассивной беговой дорожки может обуславливать более сильное нерцепрокное (Ib) торможение α -МН мышц экстензоров (GM) и менее выраженное – мышц флексоров (TA). Можно выразить мнение, что данные нерцепрокные тормозные взаимодействия мышц-антагонистов голени отражают мощность, развиваемую мышцами в течение цикла скоростного локомоторного движения. Однако, в разные фазы бегового шага отмечались изменения в межмышечной афферентации мышц голени, характеризующиеся разнонаправленной импульсной активностью первичных и вторичных волокон в обеспечении скоростного бегового движения (рис. 2А). Такая разнонаправленная межмышечная афферентация, вероятно, необходима не только для активации возбуждающих и тормозных ИН, но и для осуществления разнообразных коррекций на спинальном уровне и в структурах головного мозга. Кроме того, афферентные влияния наиболее выражены в те фазы скоростного движения, когда отмечалась наибольшая ЭМГ-активность мышц. Так, анализ афферентной активности в разные фазы бегового шага, представленный на рис. 2А выявил, что в фазе опоры наиболее активны афференты Ia, Ib, II правого флексора (TA; $p=0,000^+$) и левого экстензора (GM; $p=0,000^+$) и, соответственно, их ЭМГ-активность была значительно выражена, а в фазу переноса преобладает импульсация афферентов левого флексора (TA; $p=0,000^+$) и правого экстензора (GM; $p=0,000^+$), проявляющаяся также высокой ЭМГ-активностью данных мышц. Роль афферентных влияний заметно снижалась в фазы низкоамплитудной ЭМГ-активности мышц голени.

Сравнительный анализ межмышечной афферентной активности в разные фазы бегового шага, представленный на рис. 2А выявил, что в фазе опоры правой конечности повышалась импульсная активность афферентных волокон Ia и II ТА ($p=0,000^*$) соответственно относительно GM, но все же более выраженной активностью Ib афферентов GM ($p=0,000^*$). В фазе переноса правой конечности активность первичных (Ia и Ib) и вторичных афферентов GM, в сравнении с афферентами ТА, больше ($p=0,000^*$), соответственно. Импульсная активность афферентов Ia, Ib и II афферентов GM в фазе опоры левой конечности проявлялась аналогичным образом, т.е., как и при переносе правой конечности: их активность была больше ($p=0,000^*$) соответственно, относительно афферентов ТА. При переносе левой конечности импульсная активность афферентов Ia и II ТА проявлялась таким же образом, как и при опоре правой конечности: их активность была выше ($p=0,000^*$) соответственно по сравнению с афферентами GM, но у афферентов Ib GM активность была больше ($p=0,000^*$), чем у сенсорных волокон Ib ТА. Наши данные указывают также о перекрёстных взаимодействиях афферентной активности гомологичных мышц голени билатеральных конечностей в разные фазы скоростного движения, сопровождающиеся выраженной активностью афферентов Ia, Ib, II правого сгибателя стопы (ТА; $p=0,000^{**}$; рис. 2А) в фазу опоры и правого разгибателя стопы (GM; $p=0,000^{**}$) в фазу переноса, чем у гомологичных мышц левой конечности в те же фазы движения. В опорной фазе левой конечности, напротив, наиболее выражена активность афферентов Ia, Ib, II разгибателя стопы (GM; $p=0,000^{**}$), а при её переносе – активность аналогичных афферентов от сгибателя стопы (ТА; $p=0,000^{**}$). Обнаруженные нами перекрёстные явления в афферентной активности, вероятно, обусловлены афферентным перекрёстным торможением через комиссуральные ИН СМ (рис. 3В) при альтернирующей активации билатеральных флексоров и экстензоров в фазы опоры и переноса конечностей.

С точки зрения существующей концепции двухуровневой нейронной модели ЦГП (Rybak et al., 2006, 2015; Takakusaki, 2017) и известных взаимодействий различных проприорецептивных афферентных входов на интернейрональный аппарат СМ (Плещинский, Алексеева, 1996; Pierrot-Deseilligny, Burke, 2012; Rybak et al., 2006; Jankowska, 2016) можно предположить, что в реализации сложно-координированных скоростных движений в разные его фазы конвергенция афферентных потоков от билатеральных мышц-флексоров и экстензоров модулируют спинальные ИН, α -МН, γ -МН и ЦГП, обеспечивая тем самым реципрокные взаимоотношения мышц-антагонистов. Характерный локомоторный паттерн скоростных движений подвержен нисходящим тоническим (кортикоспинальный тракт) и фазическим (или циклическим) (ретикуло- и вестибулоспинальные тракты) влияниям от коры головного мозга, мозжечка, ядер ствола мозга, ретикулярной формации, оказывающих возбуждающие и тормозные влияния, адресованные ИН и МН моно-, поли- и олигосинаптических рефлекторных дуг СМ (рис. 3).

При МССМ в фазу опоры бегового шага повышалась ЭМГ-активность

BF, TA правой и VL левой конечностей, а в фазу переноса – VL, GM правой и TA левой конечностей. Внутримышечная координация в фазу опоры сопровождалась увеличением ЭМГ-активности VL на 27,84 ($p=0,000$) и GM – на 17,38% ($p=0,000$) левой конечности, BF и TA правой конечности – на 22,40 ($p=0,001$) и 8,93% ($p=0,013$), в фазу переноса – BF и GM правой конечности на 9,57 ($p=0,000$) и 33,35% ($p=0,000$), а также TA левой конечности – на 9,95% ($p=0,000$). Межмышечная координация сопровождалась повышением в фазу опоры ЭМГ-активности BF и TA правой конечности на 23,04 ($p=0,002$) и 21,74% ($p=0,000$), VL левой конечности – на 30,55% ($p=0,000$), а в фазе переноса – VL правой на 0,46 ($p=0,000$) и VL левой конечности – на 15,79% ($p=0,005$) конечностей, TA левой конечности – на 26,09% ($p=0,014$).

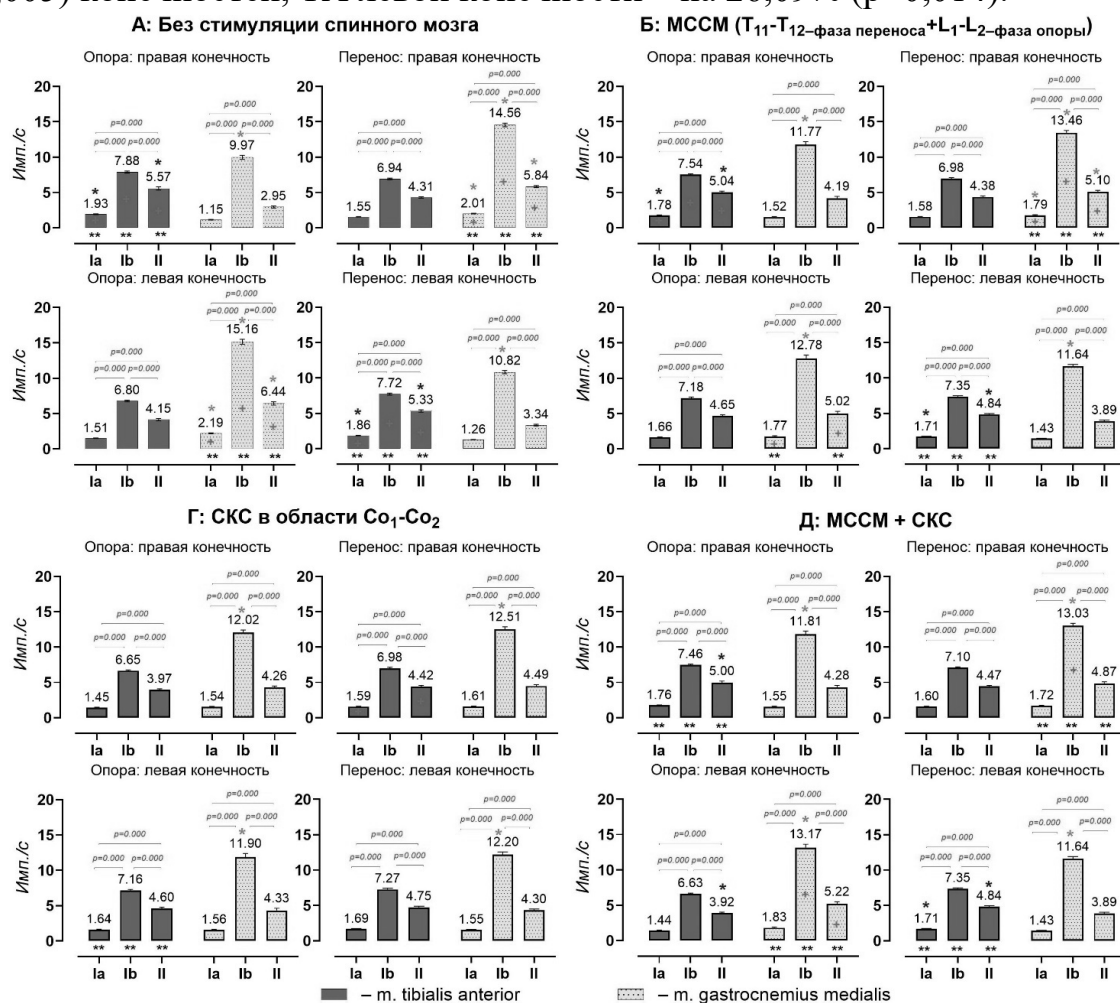
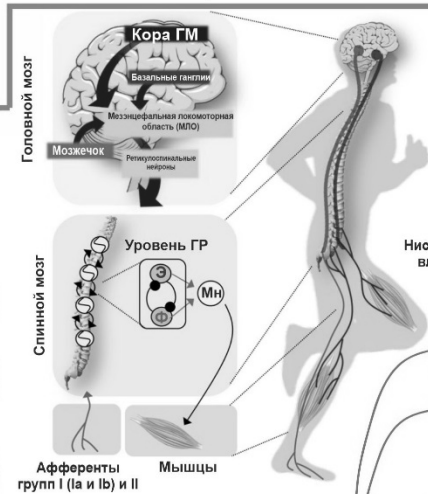


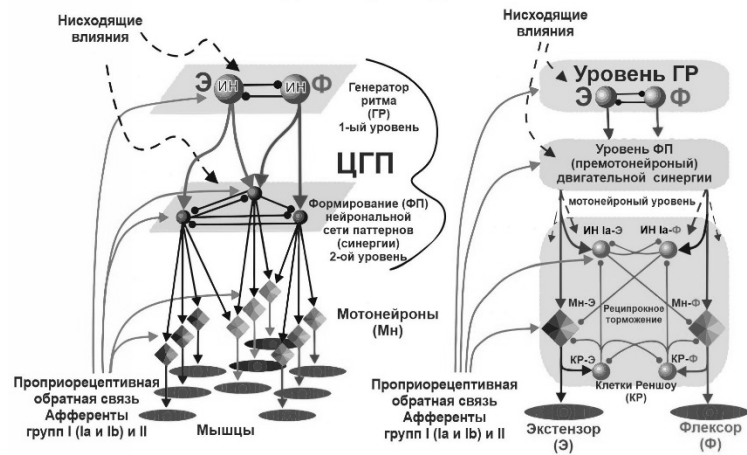
Рис. 2. Импульсная активность афферентов Ia, Ib и II групп мышц-антагонистов голени билатеральных конечностей в фазах опоры и переноса бегового шага во время проталкивания пассивной беговой дорожки без (А) и во время стимуляции разных зон СМ (Б-Д), имп./с (n=9).

Примечание: р – достоверные отличия при уровне значимости $p=0,05$ (критерий Ньюмана-Кеулса); $p=0,000$ – достоверные отличия во внутримышечной афферентной активности различных афферентов флектора и экстензора голени; * – достоверные отличия в межмышечной афферентной активности различных афферентов в системе мышц-антагонистов; ** – достоверные отличия в перекрёстных эффектах афферентной активности гомологичных мышц билатеральных конечностей; + – достоверные отличия в импульсной активности афферентов мышц-антагонистов между фазами опоры и переноса; активность афферентов Ia и II представлена на графиках в $\text{имп./с} \times 10^3$, афферентов Ib – $\text{имп./с} \times 10^4$.

А: Иерархическая организация управления автоматизированными движениями



Б: Модель ЦГП одной конечности



В: Модель ЦГП билатеральных конечностей

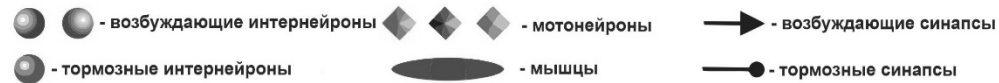
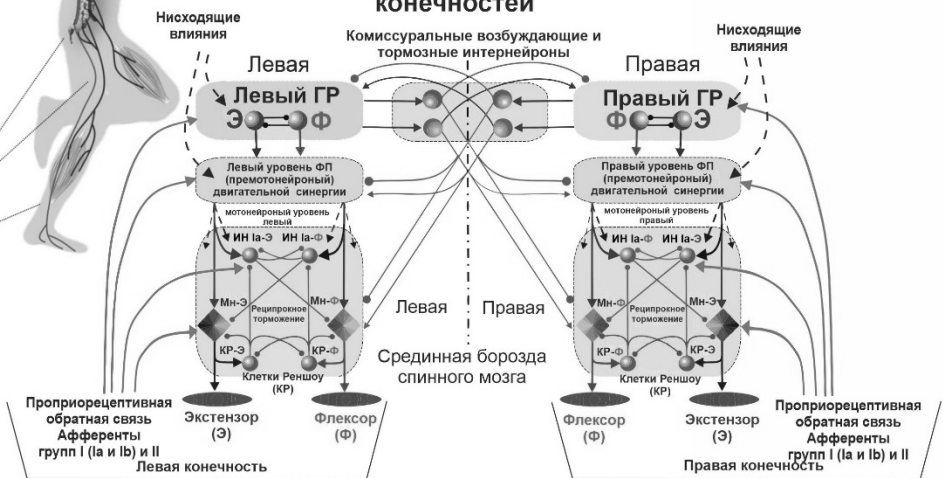


Рис. 3. Двухуровневая («two-level half-center») нейронная модель ЦГП и проприорецептивные афферентные входы на интернейрональный аппарат СМ (адаптировано из Rybak et al., 2006, 2015; Takakusaki, 2017).

Реципрокность гомонимных мышц бедра была больше в фазу опоры правой конечности, а в фазу переноса – мышц бедра левой конечности и голени правой конечности. Выраженность синергии гетеронимных мышц правой и левой конечностей одинаковая ($p > 0,05$) независимо от фазы бегового шага. В фазу опоры проявлялась наибольшая импульсная активность афферентов Ia, Ib, II TA ($p = 0,001^+$; рис. 2Б) правой конечности и афферентов Ia, II GM ($p = 0,002^+$) левой конечности, в фазу переноса – активность Ia, Ib, II GM ($p = 0,017^+$; $p = 0,002^+$; $p = 0,017^+$) правой конечности, при этом афферентная активность различных групп мышц голени левой конечности не изменялась ($p > 0,05$). Перекрестные афферентные взаимодействия гомологичных мышц в фазу опоры проявляются наибольшей активностью Ia ($p = 0,028^{**}$) и II ($p = 0,039^{**}$) афферентов GM левой конечности, в фазу переноса – Ia ($p = 0,028^{**}$), Ib ($p = 0,049^{**}$), II ($p = 0,028^{**}$) афферентов TA левой конечности и Ia ($p = 0,000^{**}$), Ib ($p = 0,000^{**}$), II ($p = 0,000^{**}$) афферентов GM правой конечности.

При СКС в фазах опоры и переноса возрастала ЭМГ-активность VL и BF правой конечности, TA левой конечности. Внутримышечная координация проявлялась в фазе опоры увеличением амплитуды ЭМГ VL правой конечности на 36,15% ($p = 0,000$), GM и TA левой конечности – на 1,10 ($p = 0,000$) и 14,39% ($p = 0,000$), в фазу переноса – BF и GM правой конечности на 24,45 ($p = 0,000$) и 3,88% ($p = 0,000$), TA левой конечности – на 7,36% ($p = 0,000$). СКС усиливала межмышечную координацию, которая выражалась в фазу опоры повышением ЭМГ-активности BF правой конечности на 18,20% ($p = 0,000$) и BF левой конечности – на 28,89% ($p = 0,001$), GM правой конечности – на 7,20% ($p = 0,000$), а в фазу переноса – TA левой конечности на 10,30% ($p = 0,000$). СКС способствовала в фазу опоры выраженной реципрокности гомонимных мышц бедра (VL×BF) билатеральных конечностей, синергии гетеронимных мышц (VL×GM) обеих конечностей и мышц (BF×TA) правой конечности, и повышала в фазу переноса активность Ia ($p = 0,045^+$; рис. 2Г) и II ($p = 0,045^+$) афферентов TA правой конечности. Наиболее выраженные перекрестные афферентные взаимодействия гомологичных мышц проявлялись в фазу опоры с большей активностью Ia ($p = 0,004^{**}$), Ib ($p = 0,006^{**}$), II ($p = 0,004^{**}$) афферентов TA левой конечности относительно правой конечности (рис. 2Г).

МССМ совместно с СКС в фазу опоры повышала ЭМГ-активность TA правой и VL левой конечностей, а в фазу переноса – VL и GM правой конечности, BF правой и TA левой конечностей. Внутримышечная координация проявлялась в фазу опоры увеличением активности BF правой конечности на 7,41% ($p = 0,019$) и GM левой конечности – на 18,75% ($p = 0,000$), а в фазу переноса – VL и GM правой конечности на 43,56 ($p = 0,000$) и 28,43% ($p = 0,000$), BF правой конечности – на 13,02% ($p = 0,000$) и TA левой конечности – на 16,28% ($p = 0,000$). МССМ+СКС повышала межмышечную координацию, сопровождающуюся в фазу опоры возрастанием амплитуды ЭМГ BF и TA правой конечности на 13,04 ($p = 0,024$) и 17,72% ($p = 0,000$), VL и GM левой конечности – на 25,85 ($p = 0,000$) и 25,97% ($p = 0,009$), а в фазу переноса – VL и GM правой конечности на 14,37 ($p = 0,000$) и 8,65% ($p = 0,000$), BF и TA левой

конечности – на 9,96 ($p=0,002$) и 40,08% ($p=0,002$). Выраженная реципрокность мышц бедра (VL×BF) проявлялась в фазах опоры правой и переноса левой конечностей, а мышц голени (TA×GM) – в фазы опоры левой и переноса правой конечностей. В фазе опоры правой конечности возрастала синергия гетеронимных мышц-экстензоров (VL×GM) и флексоров (BF×TA), в фазе переноса – мышц-экстензоров (VL×GM) левой конечности. МССМ совместно со СКС в фазу опоры левой конечности способствовала большей активности Ib и II афферентов GM ($p=0,000^+$, рис. 2Д), в фазу переноса – активности Ib GM ($p=0,000^+$) правой конечности и афферентов Ib, II TA ($p=0,000^+$) левой конечности. При этом перекрёстные афферентные взаимодействия гомологичных мышц проявляются наибольшей активностью афферентов Ia ($p=0,000^{**}$), Ib ($p=0,000^{**}$), II ($p=0,000^{**}$) правого TA в фазу опоры и правого GM (p от 0,027** до $p=0,034^{**}$) в фазу переноса, а фазу опоры левой конечности, напротив, наиболее выражена активность Ia, Ib, II GM, при ее переносе аналогичных афферентов от TA.

В целом можно констатировать, что эффективной методикой неинвазивного электрического воздействия на СМ, оказывающего значительный нейромодулятивное влияние на функциональное состояние нервно-мышечного аппарата и повышение скоростных способностей у легкоатлетов, является сочетанная МССМ+СКС. Положительный эффект данной методики, в сравнении с МССМ и СКС, сопровождался наибольшими достоверно значимыми темпами приростов амплитуды ЭМГ экстензора бедра в фазы опоры правой (VL – на 24,63-43,52%, p от 0,000 до 0,045) и переноса левой (VL – на 3,05-8,88%, $p=0,022$) конечности, флексора голени – в фазе переноса правой (TA – на 21,38-21,54%, $p=0,000$) и левой (TA – на 7,28-11,63%, p от 0,000 до 0,025) конечностей, а также импульсной активности афферентных Ia волокон на 7,42-10,08% ($p=0,000$), Ib – на 3,56-5,48% ($p=0,000$), II – на 7,61-11,16% ($p=0,000$) флексора стопы (TA) при переносе левой конечности.

Сочетанная МССМ+СКС в сравнении без и двумя другими стимуляциями повышала темп бега на 0,23-1 шагов, скорость антропометрических точек – на 0,10-0,11 мм/с и ускорение – на 0,26-0,27 мм/с*м. Эффект данного сочетанного стимуляционного воздействия проявляется в положительных тенденциях прироста темпа бега, дистанции, скорости и ускорений антропометрических точек, характеризующих скоростные способности у спортсменов-легкоатлетов (табл. 1).

Вышеизложенные результаты, полученные в экспериментальных и модельных исследованиях, позволили уточнить зоны СМ, стимуляция которых вызывает преимущественную активацию проприоцептивных афферентных входов к мотонейронным пулам проксимальных и дистальных мышц-антагонистов билатеральных нижних конечностей в определённые фазы бегового шага. Показано, как различные виды неинвазивного электрического воздействия на СМ нейромодулируют нервно-мышечные структуры опорно-двигательного аппарата спортсменов-легкоатлетов в структуре бегового шага с максимальной скоростью. Тот факт, что при мультисегментарной стимуляции

СМ совместно со стимуляцией копчикового сплетения происходит увеличение показателей темпа бега, скорости и ускорений антропометрических точек, повышение биоэлектрической активности рабочих мышц и их афферентной активности в различные периоды бегового шага, позволяет предположить, что такое воздействие на СМ может быть использовано как дополнительное средство целенаправленной регуляции бега с максимальной скоростью. Выявленные нами закономерности изменения функционального состояния НМА спортсменов-легкоатлетов при скоростных локомоторных движениях в процессе электрической стимуляции разных зон СМ подтверждают результаты, полученные Городничевым с соавторами (2021) при выполнении ходьбы в условиях адресного воздействия на моторные пулы посредством неинвазивной электрической стимуляции СМ.

Табл. 1. Кинематические характеристики скоростных локомоторных движений в цикле двойного бегового шага у спортсменов-легкоатлетов во время проталкивания пассивной беговой дорожки при неинвазивной электрической стимуляции разных зон СМ и без электровоздействия, n=9, М [Min-Max].

Показатели	Без стимуляции (1)	Зоны стимуляции СМ						Р-уровень
		МССК (2)	Тр, %	СКС (3)	Тр, %	МССК+СКС (4)	Тр, %	
Темп бега, количество шагов в течение 10 секунд	17,78 [16; 19]	18,44 [16; 20]	0,90	17,67 [16; 19]	-1,18	18,67 [17; 19]	2,17	P ₁₋₂ =0,064 P ₁₋₃ =0,575 P₁₋₄=0,030 P₂₋₃=0,005 P ₂₋₄ =0,346 P₃₋₄=0,001
Дистанция антропометрических точек Врт×Вбц×Нбц×Кнч, мм	0,73 [0,01; 2,67]	0,73 [0,01; 2,42]	3,31	0,72 [0,02; 2,27]	3,11	0,77 [0,01; 4,26]	2,46	P ₁₋₂ =1,000 P ₁₋₃ =0,905 P ₁₋₄ =0,164 P ₂₋₃ =0,159 P ₂₋₄ =0,346 P ₃₋₄ =0,408
Скорость перемещения антропометрических точек Врт×Вбц×Нбц×Кнч, мм/с	2,80 [0,03; 14,84]	2,76 [0,02; 12,92]	4,13	2,77 [0,02; 6,84]	-5,25	2,87 [0,04; 26,65]	2,21	P₁₋₂=0,030 P₁₋₃=0,039 P₁₋₄=0,011 P ₂₋₃ =0,942 P₂₋₄=0,000 P₃₋₄=0,003
Ускорение антропометрических точек Врт×Вбц×Нбц×Кнч, мм/с*м	0,29 [0,03; 14,84]	0,28 [0,01; 7,37]	-2,29	0,29 [0,01; 6,40]	2,32	0,55 [0,01; 33,70]	3,15	P ₁₋₂ =0,094 P ₁₋₃ =0,420 P₁₋₄=0,006 P ₂₋₃ =0,239 P₂₋₄=0,001 P ₃₋₄ =0,073

Примечание: Врт – вертельная, Вбц – верхнеберцовая, Нбц – нижнеберцовая, Кнч – конечная; Тр – темпы прироста, %; р – достоверные отличия при уровне значимости р=0,05 (критерий Вилкоксона).

ВЫВОДЫ

1. Закономерное проявление амплитуды ВМО билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов зависит от зоны воздействия на спинной мозг чрескожной электрической стимуляции, и обоснованно различным расстоянием анатомического расположения мотонейронных пулов мышц бедра и голени в сегментах спинного мозга и зонами активации спинального участка. Стимуляция зон спинного мозга на уровне грудных T₁₁-T₁₂ позвонков вызывает большую рефлекторную возбудимость проксимальных мышц (*m. rectus femoris*, *m. biceps femoris*) билатеральных конечностей, на уровне поясничных L₁-L₂ позвонков – проксимальных (*m. rectus femoris*, *m. biceps femoris*) и дистальных (*m. gastrocnemius medialis*) мышц, а стимуляция нижележащей зоны, в области копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂ позвоночника, – билатеральных мышц-экстензоров (*m. gastrocnemius medialis*) голени. Постактивационное влияние кратковременной ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения закономерно оказывает преимущественно облегчающие влияния на мотонейронные пулы спинальных центров мышц билатеральных нижних конечностей, вне зависимости от продолжительности самого воздействия.

2. Скоростной бег характеризуется закономерными всплесками ЭМГ-активности экстензоров левой и флексоров правой конечностей в фазу опоры, экстензоров правой и флексора левой конечностей в фазу переноса, спадами активности флексоров левой и экстензоров правой конечностей в опорный период, в переносную фазу – экстензоров левой и флексора правой конечностей, а флексоры бедра билатеральных конечностей активны одновременно. При этом выявлены: эффективная согласованная внутримышечная координация проксимальных/дистальных мышц билатеральных конечностей и межмышечная координация экстензоров/флексоров бедра билатеральных конечностей и голени правой конечности в фазы опоры и переноса; выраженные реципрокные отношения гомонимных мышц-антагонистов бедра в фазу опоры правой и переноса левой конечностей, мышц-антагонистов голени – в фазу переноса правой конечности и опорный период левой конечности; синергетические отношения гетеронимных мышц-агонистов бедра и голени в фазу опоры правой и переноса левой конечностей; специфическая внутри-, межмышечная и перекрёстная проприоцептивная афферентация первичных и вторичных афферентных волокон мышц голени.

3. Внутримышечная афферентация мышц-антагонистов голени, вне зависимости от фазы скоростных локомоторных движений, закономерно характеризуется проявлением сильной импульсной активностью афферентов Ib экстензоров и флексоров голени, умеренной активностью – афферентов II и слабой – Ia афферентов. Межмышечной афферентации мышц-антагонистов голени присуща разнонаправленная импульсная активность первичных и вторичных афферентов в разные фазы скоростного движения. Перекрёстный

афферентные взаимодействия гомологичных мышц при скоростном локомоторном движении закономерно зависят от фазы бегового шага, сопровождающиеся выраженной активностью Ia, Ib, II правого флексора стопы в фазу опоры и правого экстензора стопы в фазу переноса, чем у гомологичных мышц левой конечности в те же фазы движения. В опорной фазе левой конечности, напротив, наиболее выражена активность афферентов Ia, Ib, II экстензора стопы, а при её переносе – аналогичных афферентов от флексора стопы.

4. Влияния мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в зонах T₁₁-T₁₂ в фазу переноса и L₁-L₂ в фазу опоры, селективной ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения на уровне Co₁-Co₂ и мультисегментарной стимуляции в различные фазы движения совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения в цикле скоростного бегового шага у спортсменов-легкоатлетов проявляются закономерной для каждого вида неинвазивного воздействия фазовисимой нейромодуляцией ЭМГ-активности флексоров и экстензоров билатеральных нижних конечностей, внутри- и межмышечной координации, реципрокных и синергетических отношений, афферентной активности Ia, Ib, II входов, регулирующих нейронные сети генераторов шагательных паттернов.

5. Сравнение электромиографических и кинематических параметров при чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга во время скоростного локомоторного движения показывает ключевую закономерность, проявляющуюся значительным нейромодулятивным влиянием мультисегментарной стимуляции в различные фазы движения совместно со стимуляцией копчикового сплетения на функциональное состояние НМА. Это выражается увеличением амплитуды ЭМГ экстензора бедра в фазах опоры правой и переносе левой конечностей, флексора голени в фазе переноса правой и левой конечностей, импульсной активности афферентных Ia, Ib, II волокон флексора стопы при переносе левой конечности, темпа бега, скорости и ускорений антропометрических точек при реализации скоростных циклических движений спортсменами-легкоатлетами.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Рекомендуем применять методику мультисегментарной электрической стимуляции спинного мозга в области нижнегрудных T₁₁-T₁₂ и верхнепоясничных L₁-L₂ позвонков совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения в области Co₁-Co₂ (параметры стимуляции: импульсы прямоугольной формы, частота следования импульсов – 30 Гц, длительность импульсов – 0,5 мс, прямоугольные импульсы с несущей частотой 10 кГц) как дополнительное средство повышения скоростных способностей спортсменов и достижения высшего спортивного мастерства легкоатлетами в тренировочном процессе; оптимизации восстановительных мероприятий после крупных спортивных состязаний и в условиях напряженного соревновательного микроцикла; в практике восстановительной

спортивной медицины для коррекции состояния НМА на фоне утомления и переутомления, вызванных интенсивными нагрузками и спортивной гиперкинезией.

2. Методика регистрации вызванных моторных ответов билатеральных нижних конечностей в ответ на одиночную неинвазивную электрическую стимуляцию копчикового сплетения в области Co_1-Co_2 позвоночника может быть использована в системе комплексного контроля и мониторинга функционального состояния спортсменов для оценки текущего уровня возбудимости спинальных структур и резервных возможностей НМА; в научно-исследовательской работе в области спортивной физиологии и медицины для углубленного изучения нейрофизиологических механизмов управления движениями и оценки эффективности различных тренировочных и восстановительных воздействий.

3. Методики чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга могут быть включены в содержание соответствующих разделов при написании методических и справочных рекомендаций по клинической электронейромиографии.

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научные положения, выводы и практические рекомендации **внедрены** в практику МБУ ДО «Детско-юношеская спортивная школа №1 «Атлетика», МБУ ДО «Детско-юношеская школа № 3 «Олимпия», Научно-исследовательского института проблем спорта и оздоровительной физической культуры ФГБОУ ВО «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта», ООО медицинского центра «МедТайм».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Вбц – верхнеберцовая антропометрическая точка;

ВМО – вызванные моторные ответы;

Врт – вертельная антропометрическая точка;

Кнч – конечная антропометрическая точка;

ИН – интернейроны;

МН – мотонейроны;

МССМ – мультисегментарная электрическая стимуляция спинного мозга в различные фазы движения ($T_{11}-T_{12}$ -фаза переноса+ L_1-L_2 -фаза опоры);

МССМ+СКС – мультисегментарная электрическая стимуляция спинного мозга в различные фазы движения совместно с ритмической электрической стимуляцией копчикового сплетения ($T_{11}-T_{12}$ -фаза переноса+ L_1-L_2 -фаза опоры+ Co_1-Co_2);

Нбц – нижеберцовая антропометрическая точка;

НМА – нервно-мышечный аппарат; рЭС – ритмическая электрическая стимуляция спинного мозга;

СКС – селективная ритмическая электрическая стимуляция копчикового сплетения (Co_1-Co_2);

СМ – спинной мозг;

ЧЭССМ – чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга; ЭМГ – электромиография;

ЦПП – центральный генератор паттернов;
BF – m. biceps femoris;
GM – m. gastrocnemius medialis;
RF – m. rectus femoris;
VL – m. vastus lateralis;
TA – m. tibialis anterior.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ

1. **Барканов, М.Г.** Особенности вызванных мышечных ответов и кинематических параметров скоростных локомоторных движений при чрескожной электрической стимуляции разных зон спинного мозга / **М.Г. Барканов**, Р.М. Городничев // Физиология человека. – 2022. – Т. 48, № 5. – С. 49-59. (K1, RSCI, Scopus).
2. Моделирование импульсной активности афферентных волокон мышц-антагонистов голени при чрескожной электрической стимуляции спинного мозга во время ходьбы / Д.А. Гладченко, И.В. Алексеева, А.А. Челноков, **М.Г. Барканов** // Физиология человека. – 2024. – Т. 50, № 1. – С. 34-44 (K1, RSCI, Scopus).
3. Эффекты чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на кинематические и электромиографические параметры скоростных циклических движений / **М.Г. Барканов**, Р.М. Городничев, С.А. Моисеев, В.Н. Шляхтов // Теория и практика физической культуры. – 2022. – № 5. – С. 37-39 (K1, Scopus).
4. **Barkanov, M.G.** Peculiarities of Induced Muscle Responses and Kinematic Parameters of High-Speed Locomotor Movements under Percutaneous Electrical Stimulation of Different Spinal Cord Areas / M.G. Barkanov, R.M. Gorodnichev // Human Physiology. – 2022. – Vol. 48, No. 5. – P. 526-534. (K2, Scopus).
5. Modeling of Impulse Activity of Afferent Fibers of Antagonist Muscles during Transcutaneous Electrical Stimulation of the Spinal Cord During Walking / D.A. Gladchenko, I.V. Alekseeva, A.A. Chelnokov, **M.G. Barkanov** // Human Physiology. – 2024. – Vol. 50, No. 1. – P. 25-34. (K2, Scopus).
6. Peculiarities of Afferent Innervation of Antagonist Muscles of the Bilateral Lower Legs during High-Speed Locomotor Movements / A.A. Chelnokov, **M.G. Barkanov**, D.A. Gladchenko, R.M. Gorodnichev // J Evol Biochem Phys. – 2025. – Vol. 61, No. 3. – P. 850-860 (K2, Web of Science).
7. Особенности афферентного обеспечения мышц-антагонистов голени билатеральных конечностей при скоростных локомоторных движениях / А.А. Челноков, **М.Г. Барканов**, Д.А. Гладченко, Р.М. Городничев // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. – 2025. – Т. 111, № 7. – С. 1153-1167 (K1, RSCI).

Статьи, опубликованные в журналах и сборниках материалов конференции

8. Новый метод повышения координационных способностей спортсменов / А.М. Пухов, П.В. Иванов, **М.Г. Барканов**, Р.М. Городничев // Физическое воспитание и спортивная тренировка. – 2019. – № 3(29). – С. 90-97.
9. **Barkanov, M.G.** Running movements and coordination structure characteristics under spinal cord transcutaneous electrical stimulation. / M.G. Barkanov, S.M. Ivanov, E.A. Mikhaylova, N.G. Ershova // Recent Researches in Sports Science. – Szombathely, Hungary: Savaria University Press, 2020. – С. 7-12.
10. **Барканов, М.Г.** Эффекты ритмической электрической стимуляции спинного мозга на координационную структуру бегового шага / М.Г. Барканов, Р.М. Городничев // Физическое воспитание и спортивная тренировка. – 2020. – № 2(32). – С. 42-49.
11. **Барканов, М.Г.** Влияние разноуровневой стимуляции спинного мозга на

тонусную активность мышц нижних конечностей / М.Г. Барканов // В сб.: Новые подходы к изучению классических проблем: Материалы IX Всероссийской с международным участием конференции с элементами научной школы по физиологии мышц и мышечной деятельности, посвящённой памяти Е.Е. Никольского. – Москва, 2019. – С. 39.

12. **Барканов, М.Г.** Влияние ритмической электрической стимуляции спинного мозга на параметры моторных ответов мышц нижних конечностей / М.Г. Барканов, Р.М. Городничев // В сб.: Физическая культура и спорт. Олимпийское образование: международная науч.-практ. конф. – Краснодар, 2020. – С. 170-172.

13. **Барканов, М.Г.** Изменение параметров бегового шага под воздействием ритмической электрической стимуляции спинного мозга / М.Г. Барканов // В сб.: Олимпийский спорт и спорт для всех: международный науч. конгресс. – Казань, 2020. – С. 606-608.

14. **Barkanov, M.G.** Rhythmic electrical stimulation of the spinal cord influence on the parameters of motor responses of the muscles of the lower extremities / M.G. Barkanov, N.G. Ershova // Modern University Sport Science: The XIV Annual International Conference for Students and Young Researchers. – Москва, 2020. – P. 42-45.

15. **Барканов, М.Г.** Особенности электромиографических и кинематических параметров бегового шага при ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения / М.Г. Барканов // В сб.: Олимпийский спорт и спорт для всех: международный науч. конгресс. – Минск, 2020. – С. 232-239.

16. **Барканов, М.Г.** Особенности кинематических и электромиографических параметров бегового шага при ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения / М.Г. Барканов // В сб.: Университетский спорт: здоровье и процветание нации: международной науч. конф. – Омск, 2020. – С. 80-86.

17. **Барканов, М.Г.** Изменение кинематических параметров бегового шага при стимуляции спинного мозга / М.Г. Барканов, Р.М. Городничев // В сб.: Биомеханика двигательных действий и биомеханический контроль в спорте: всероссийская науч.-практ. конф. с международным участием. – Москва, 2020. – С. 11-13.

18. **Барканов, М.Г.** Изменение параметров вызванных потенциалов мышц нижних конечностей при разноуровневой стимуляции спинного мозга / М.Г. Барканов, Р.М. Городничев // В сб.: Физическая культура и спорт. Олимпийское образование: международная науч.-практ. конф. – Краснодар, 2021. – С. 159-161.

19. **Барканов, М.Г.** Об избирательной активации мотонейронных пулов мышц нижних конечностей посредством неинвазивной чрескожной электрической стимуляции спинного мозга / М.Г. Барканов // В сб.: Новые подходы к изучению проблем физиологии экстремальных состояний: всероссийская с международным участием школа-конференция. – Москва, 2021. – С. 31.

20. **Барканов, М.Г.** Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга как метод активации определенных мотонейронных пулов мышц нижних конечностей / М.Г. Барканов // В сб.: Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы: открытая науч.-практ. конф. – Великие Луки, 2021. – С. 106-111.

21. **Барканов, М.Г.** Влияние чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на координационную структуру скоростных циклических движений / М.Г. Барканов // В сб.: Motor control 2022: Российская, с международным участием, конференции по управлению движением. – Казань, 2022. – С. 121.

22. **Барканов, М.Г.** Влияние чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на координационную структуру скоростных циклических движений / М.Г. Барканов // В сб.: Вклад молодых ученых в разработку проблем физической культуры, спорта и олимпизма: открытая науч.-практ. конф. – Великие Луки, 2022. – С. 47-51.

23. Модельная характеристика импульсной активности афферентов различных групп на фоне ЧЭССМ во время выполнения локомоции / Д.А. Гладченко, И.В. Алексеева, А.А. Челноков, **М.Г. Барканов** // В сб.: Теоретические и прикладные аспекты

естественнонаучного образования: международная науч.-практ. конф. – Чебоксары, 2023. – С. 95-102.

24. Корчемкин, В.Н. Чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга как инновационный метод функциональной нейрореабилитации человека и животных / В.Н. Корчемкин **М.Г. Барканов**, А.А. Челноков // В сб.: Актуальные проблемы диагностики, лечения и профилактики болезней животных: всероссийская науч.-практ. конф. – Великие Луки, 2023. – С.329-337.

25. **Барканов, М.Г.** Особенности функциональной активности мотонейронных пулов билатеральных скелетных мышц нижних конечностей человека при скоростных локомоторных движениях / М.Г. Барканов, А.А. Челноков, Д.А. Гладченко, Р.М. Городничев // В сб.: Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы: открытая науч.-практ. конф. – Великие Луки, 2024. – С. 38-42.

26. Особенности ЭМГ-паттернов билатеральных скелетных мышц нижних конечностей человека при скоростных локомоторных движениях / А.А. Челноков, **М.Г. Барканов**, Д.А. Гладченко, Р.М. Городничев // В сб.: Теоретические и прикладные аспекты естественнонаучного образования: международная науч.-практ. конф. – Чебоксары, 2024. – С. 430-435.

27. **Барканов, М.Г.** Постактивационные эффекты ритмической электрической стимуляции копчикового сплетения на возбудимость спинальных центров мышц-антагонистов билатеральных нижних конечностей у спортсменов-легкоатлетов / М.Г. Барканов, А.А. Челноков // В сб.: Физическая культура, спорт, олимпизм: проблемы и перспективы. – Великие Луки, 2025. – 240 с.

28. **Барканов, М.Г.** Эффективность неинвазивных электростимуляционных воздействий разных зон спинного мозга на повышение скоростных способностей у спортсменов-легкоатлетов / М.Г. Барканов, А.А. Челноков // В сб.: XIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов высших и средних учебных заведений с международным участием. - Казань, 2025. - С. 649-651.