На правах рукописи

Иконникова Екатерина Сергеевна

ВЛИЯНИЕ КООРДИНАЦИОННОЙ ТРЕНИРОВКИ И КУРСА ДИСКРЕТНОГО РАССЛАБЛЕНИЯ МЫШЦ ПРЕДПЛЕЧЬЯ НА СЕНСОМОТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ МАНУАЛЬНОГО НАВЫКА

1.5.5 – Физиология человека и животных

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата биологических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет спорта «ГЦОЛИФК».

Научный руководитель: **МЕЛЬНИКОВ Андрей Александрович**
доктор биологических наук, профессор

Официальные оппоненты:

ЧЕЛНОКОВ Андрей Алексеевич
доктор биологических наук, доцент,
заведующий кафедрой естественно-научных дисциплин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Великолукская государственная академия физической культуры и спорта».

ШПАКОВ Алексей Васильевич
доктор биологических наук,
ведущий научный сотрудник-заведующий лабораторией физиологических эффектов гипокинетических воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук.

Защита состоится «23» декабря 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 38.2.007.02 при РУС «ГЦОЛИФК» по адресу: 105122, Москва, Сиреневый бульвар, дом 4, аудитория 603.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУС «ГЦОЛИФК» и на сайте https://gtsolifk.ru/nauka/dissertatsionniy_sovet/zaschiti_dissertatsiy

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета — Мирошников Александр Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Мануальные двигательные навыки играют ключевую роль как в реализации повседневных бытовых задач, так и в профессиональной деятельности: спорте, медицине, музыкальном исполнительстве (Sobinov A.R. et al., 2021; Lemos L. et al., 2022).

Формирование высокого уровня мануальных навыков происходит в процессе координационного обучения, основанного на многократном повторении целевого двигательного действия. По мере повторения действия умение с высоким уровнем сознательного контроля становится автоматизированным навыком, характеризующимся повышенной спецификацией и экономизацией управления мышцами (Бернштейн Н.А., 1947; Poldrack R.A. et al., 2005; Thoroughman K.A., Shadmehr R., 1999). Однако в современной спортивной науке и нейрореабилитации продолжается активный поиск новых методических подходов, которые могли бы повысить эффективность этого процесса – сократить время освоения навыка и улучшить его характеристики. Большинство существующих методов совершенствования обучения ориентированы на развитие сенсомоторных процессов, связанных с фазой сокращения мышц: развитие силовых и скоростных способностей, увеличение произвольности сенсомоторного контроля напряжения мышц (Hagert E., 2010; Yılmaz O. et al., 2024). Вместе с тем любое циклическое или дискретное движение включает не только фазу сокращения, но и фазу расслабления, эффективность которой определяют скоростно-силовые и координационные показатели двигательного акта (Kato K. et al., 2019; Pinto B.L., McGill S.M., 2020). Несмотря на то, что быстрое и точное снижение мышечного тонуса является неотъемлемой частью многих высококоординированных движений в спорте, игре на музыкальных инструментах (Kato K. et al., 2019; Watson A.H., 2006), целенаправленная тренировка способности к мышечному расслаблению практически не изучалась как фактор, влияющий на процесс формирования нового мануального навыка. Остаётся неясным: как меняются сенсомоторные характеристики формируемого навыка под влиянием тренировки дискретного расслабления целевых мышц и как эта тренировка взаимодействует с традиционной координационной тренировкой – возникает ли синергия или, напротив, интерференция двух типов двигательной практики на уровне различных сенсомоторных процессов. Данное положение и определило направление настоящего исследования.

Степень разработанности темы. В научной литературе показано, что двигательное обучение закономерно улучшает проприоцептивную

чувствительность - как пространственную точность воспроизведения суставных углов, так и точность воспроизведения мышечного усилия (Aman J.E. et al., 2015; Winter L. et al., 2022). Однако отсутствуют работы, комплексно изучающие взаимосвязь пространственных и силовых проприоцептивных свойств верхних конечностей с биомеханическими (плавность и скоординированность) и миоэлектрическими характеристиками формируемого тонко-координационного мануального навыка. Остаётся неясным, какой вклад в эффективность освоения мануального действия вносят разные модальности проприоцепции – чувство пространства и чувство усилия.

Кроме того, обучение двигательному навыку ведёт к перестройке паттернов активации мышц-агонистов и антагонистов, что проявляется в снижении амплитуды ЭМГ и переходе от повышенной коактивации к сниженной реципрокной активности (Thoroughman K.A., Shadmehr R., 1999; Seo H.G. et al., 2023). Однако данные о взаимосвязи этих электрофизиологических перестроек с реальным улучшением двигательной деятельности противоречивы (Brueckner D. et al., 2018), что указывает на необходимость изучения активности мышц-стабилизаторов и характера коактивации дистальных и проксимальных антагонистов.

Таким образом, несмотря на значительный объём исследований в области двигательного обучения, в современной литературе остаются нерешёнными следующие вопросы: 1) каковы специфические миоэлектрические адаптации функционально различных мышечных групп (агонистов, антагонистов и стабилизаторов) в процессе совершенствования тонко-координационного мануального навыка и как эти адаптации связаны с его эффективностью; 2) каково влияние целенаправленной тренировки способности к дискретному мышечному расслаблению на формирование мануального навыка и его проприоцептивные, биомеханические и биоэлектрические характеристики. Настоящее исследование направлено на восполнение этих пробелов.

Объект исследования: сенсомоторные процессы (биомеханическая гладкость и скоординированность, проприоцептивная чувствительность, биоэлектрическая активность мышц) формирования тонко-координационного мануального навыка.

Предмет исследования: направленность изменений интегральной эффективности и сенсомоторных процессов формирования мануального навыка под влиянием тонко-координационного обучения, тренировки способности к дискретному расслаблению мышц предплечья и их сочетанного использования.

Гипотеза исследования: предполагается, что двигательное обучение путём повторений мануального навыка (специфической координационной тренировки) совместно с развитием способности к дискретному расслаблению

мышц предплечья будет более эффективно, чем эти тренировки, проводимые раздельно. То есть мы ожидаем получить при сочетанном двигательном обучении больший прирост значений показателей эффективности навыка (меньше ошибок и выше скорость прохождения мануального лабиринта), его биомеханической плавности и показателей проприоцептивных способностей (выше точность воспроизведения суставных углов), а также оптимизацию биоэлектрической активности агонистов, антагонистов и стабилизаторов (выраженное снижение уровня активности стабилизаторов и антагонистов).

Цель исследования – выявить специфику изменений сенсомоторных характеристик и эффективности формируемого мануального навыка под влиянием двигательного обучения тонко-координационному навыку, развития способности к дискретному расслаблению мышц предплечья и их сочетанного применения.

Задачи исследования:

1. Оценить влияние специфической координационной тренировки мануального навыка, программы развития дискретного расслабления мышц предплечья и их сочетанного применения на изменение интегральных показателей эффективности формируемого мануального навыка (точность и скорость прохождения лабиринта).

2. Выявить направленность адаптаций проприоцептивной чувствительности разной модальности под влиянием используемых тренировочных программ, а также взаимосвязь эффективности мануального навыка с пространственной и силовой проприоцептивными способностями.

3. Определить влияние специфической координационной тренировки мануального навыка, программы развития дискретного расслабления мышц предплечья и их сочетанного применения на биомеханическую плавность и суставную скоординированность мануальных движений, а также оценить их взаимосвязь с проприоцептивным контролем.

4. Выявить особенности изменений биоэлектрической активности функционально различных мышечных групп при выполнении мануального навыка, а также их взаимосвязь с эффективностью формируемого навыка в результате специфической координационной тренировки, программы тренировки дискретного расслабления мышц предплечья и их сочетанного применения.

Научная новизна. Принципиально новыми являются результаты, полученные при сравнении влияния тренировки дискретного мышечного расслабления с курсом двигательного обучения и их сочетанного воздействия на точность воспроизведения суставных углов и точность усилий тренируемых мышц предплечья правой руки. Установлено, что тренировки оказывали

специфический эффект на проприоцептивную чувствительность разной модальности. Повторение тонко-координационного мануального навыка увеличивало точность воспроизведения суставных углов, а тренировка дискретного мышечного расслабления была более эффективной в развитии силовой проприоцепции. Сочетанная тренировка, включающая в себя тонко-координационную тренировку и тренировку дискретного расслабления мышц предплечья, оказывала незначительное положительное влияние на обе проприоцептивные способности.

Новые данные получены при изучении интегральных параметров плавности (показатель длины дуги спектра скорости прохождения лабиринта) и координированности (показатель дисперсии колебаний суставных углов, объясняемый первыми двумя главными компонентами) движений верхней конечности при прохождении лабиринта. Установлено, что обучение прохождению лабиринта оказалось эффективным для увеличения скорости и длины проходимого пути и для повышения плавности и скоординированности тренируемого двигательного действия. Тренировка дискретного расслабления целевых мышц не вызвала позитивных изменений в скорости и плавности прохождения лабиринта, а значение показателя скоординированности прохождения лабиринта снизилось. Совместное использование разнонаправленных упражнений оказывало минимальное влияние на плавность и скоординированность движения. Повышение плавности связано как с увеличением скорости прохождения лабиринта, так и с ростом пространственной проприоцептивной способности лучезапястного сустава.

Новые данные получены при изучении изменений биоэлектрической активности целевых мышц, вызванных тремя тренировочными программами. Совершенствование навыка в результате регулярных повторений тонко-координационного навыка, а также сочетанной координационной тренировки с дискретным мышечным расслаблением приводило к существенному снижению уровня активности проксимальной мускулатуры, обеспечивающей стабилизацию плечевого пояса, с параллельной оптимизацией дистальной координации: уменьшением избыточной активности антагонистов при пронации (*m. biceps brachii*) и супинации (*m. pronator teres*), а также агониста при пронации.

В ходе исследования впервые разработана и экспериментально апробирована новая методика тренировки мышечных усилий мышц предплечья на основе дискретного мышечного расслабления.

Теоретическая значимость работы состоит в раскрытии физиологических механизмов обучения мануальным навыкам под влиянием тренировок, сочетающих специфическое повторение движений с направленным

развитием способности к мышечной релаксации. Результаты и выводы об особенностях биоэлектрической активности функционально различных мышечных групп, а также состоянии пространственной, силовой проприоцепции и биомеханических показателях плавности движений на разных уровнях владения мануальными навыками дополняют теоретические представления о физиологических механизмах управления движениями.

Практическая значимость. Выводы и положения по результатам исследования могут использоваться в средних и высших учебных заведениях в преподавании таких дисциплин, как биомеханика, физиология мышечной деятельности, в том числе для подготовки методических и практических работ, а также лекций по темам: «Физиологические механизмы управления движениями», «Обучение двигательным навыкам», «Физиология сенсорных и двигательных систем».

Методика дискретного расслабления мышц предплечья, а также принцип данного методического подхода, заключающийся в развитии способности дискретно расслаблять мышцы после их сокращения, может применяться в тренировочном процессе спортсменов, занимающихся сложно-координационными видами спорта, с целью совершенствования сенсомоторных процессов управления конечностями, а также в двигательной реабилитации пациентов с неврологическими нарушениями в центрах неврологии.

Легитимность исследования. Все процедуры исследования были одобрены локальным этическим комитетом ФГБНУ «Российский центр неврологии и нейронаук» (протокол № 12 от 27.12.2020). Все участники исследования предоставили добровольное информированное согласие на участие в исследовании, что соответствует принципам биоэтики.

Методология исследования. Теоретико-методологической основой исследований являются классические и современные представления о нейрофизиологических, биомеханических и миоэлектрических механизмах регуляции движений человека (Городничев Р.М., Шляхтов В.Н., 2022; Шпаков А.В., Воронов А.В., Фомина Е.В. и др., 2013), в том числе управления движениями руки (Kopta J.A., 1971; Zatsiorsky V.M., Latash M.L., 2008; Moiseev S., Gorodnichev R., Gerasimenko Y., 2026), а также теоретико-методологические принципы обучения двигательным навыкам (Бернштейн Н.А., 1947; Hobart D.J., 1975).

Проведённое исследование относится к проспективному рандомизированному контролируемому эксперименту с факторным дизайном 2x2. Практически здоровые участники исследования ($n = 40$) были распределены в одну из 4 групп по 10 человек случайным образом. Эффективность тренировок оценивалась относительно контрольной группы без

вмешательств. Группы формировались с учётом двух независимых факторов: первый фактор – тонко-координационная тренировка мануального навыка прохождения лабиринта, второй фактор – тренировка способности к дискретному расслаблению мышц предплечья. Внутригрупповым фактором был этап тестирования (до начала проведения эксперимента и после 10 тренировок). В исследовании учитывались международные стандарты CONSORT для неклинических исследований с немедикаментозным вмешательством (Boutron I. et al., 2017).

Положения, выносимые на защиту:

1. Наибольшей эффективностью для комплекса сенсомоторных показателей формируемого мануального навыка (точность, скорость, плавность и скоординированность движений кисти), а также оптимизации паттернов ЭМГ-активности обладает специфическая тонко-координационная тренировка. Сочетанное развитие способности к дискретному расслаблению ведущих мышц не оказывает аддитивного позитивного влияния на интегральную эффективность и сенсомоторные характеристики формируемого мануального навыка.

2. Пространственная и силовая проприоцептивные способности предплечья адаптируются специфично к типу тренировочного воздействия: координационная тренировка преимущественно улучшает точность воспроизведения суставных углов, что тесно взаимосвязано с эффективностью мануального навыка, тогда как тренировка дискретного расслабления – точность воспроизведения мышечного усилия.

3. Сочетанная (координационная совместно с релаксационной) тренировка на фоне её высокой интегральной результативности (скорости движения) не даёт положительного эффекта, а напротив, снижает суставную скоординированность мануального навыка, формируемую при изолированной координационной тренировке, что свидетельствует об интерференции координационного и релаксационного типов двигательного обучения, проявляющейся на уровне кинематической структуры движения.

4. Нейромышечная адаптация развивается только в группах с тонко-координационной практикой (при координационной и сочетанной тренировке), носит иерархически организованный характер и проявляется в согласованном снижении уровня избыточной активности проксимальных мышц-стабилизаторов плечевого пояса и одновременной оптимизации реципрокного взаимодействия дистальных агонистов и антагонистов предплечья (снижении коактивации при супинации, что коррелирует с уменьшением количества ошибок, и тенденции к её умеренному росту при пронации).

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов исследования подтверждается тщательностью планирования эксперимента, рандомизированным набором участников исследования в достаточном количестве, строгостью проведения всех этапов исследований (все тренировки проведены в специализированной лаборатории под контролем исследователя); использованием современных, информативных и валидных методов исследования: ЭМГ и ручного тренажёра с гониометром Pablo для оценки проприоцептивных способностей, беспроводной ЭМГ-системы Delsys, интегрированной с системой видеозахвата Vicon (оптическая система Vicon. Nexus 2.12; Oxford Metrics Group, Оксфорд, Великобритания) и программного обеспечения Nexus 2.12 (Великобритания) для оценки эффективности, а также биомеханических и миоэлектрических показателей формируемого мануального навыка; выбором адекватных методов статистики для обработки полученных данных с учётом нормальности распределения в программе Statistica v12 StatSoft; построением выводов на основе статистически значимых результатов; широкой публикацией результатов работы в рецензируемых научных изданиях и представлением их научному сообществу на конференциях разного уровня.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК РФ. Материалы доложены на 12 всероссийских и международных конференциях (Москва, 2021 (2), 2023, 2025; Казань, 2022; Судак, 2022; Санкт-Петербург, 2023, 2024; Краснодар, 2023; Великие Луки, 2024, 2026; Сочи, 2025).

Внедрение результатов. Полученные результаты используются в учебном процессе в РУС «ГЦОЛИФК» (акт внедрения от 15.05.2026), в ФГБОУ ВО СГМУ (акт внедрения от 18.05.2026), а также в лаборатории анализа движений Института нейрореабилитации и восстановительных технологий ФГБНУ «Российский центр неврологии» (акт от 02.06.2026).

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа изложена на 197 страницах, состоит из введения, 4 глав, выводов, практических рекомендаций, списка сокращений и списка литературы. Содержит 35 рисунков и 7 таблиц. Библиография включает 179 источников (18 отечественных и 161 иностранный).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Обзор литературы

В главе рассмотрены физиологические основы управления мануальными движениями (иерархическая организация двигательного контроля, роль

базальных ядер и мозжечка, механизмы сенсомоторной интеграции), значение соматосенсорной системы и проприоцептивной тренировки в формировании навыков, а также нейрофизиологические механизмы произвольного расслабления, которое является активным процессом, а не прекращением сокращения (Kato K. et al., 2019). Отмечена недостаточная изученность активности функционально второстепенных мышц-стабилизаторов в двигательном обучении, что обосновывает проблему исследования - необходимость комплексного изучения сенсомоторных процессов формирования мануального навыка под влиянием тренировки расслабления и её сочетания с координационным обучением.

Глава 2. Методы и организация исследования

Участники исследования. В исследовании приняли участие 40 практически здоровых добровольцев (20 мужчин, 20 женщин) в возрасте 18-35 лет с правым мануальным профилем. Критерии исключения: левый мануальный профиль, опыт занятий тонко-координационными видами деятельности, заболевания ЦНС и верхних конечностей. Участники исследования методом рандомизации распределены по 10 человек в 4 группы: «Координация», «Расслабление», «Сочетанная», «Контроль». Все участники исследования подписали добровольное информированное согласие (протокол этического комитета от 27.12.2020 № 12).

Методики тренировок. Курс тренировок составлял 10 занятий по 30 минут в течение 2 недель.

1. Координационная тренировка: прохождение проволочного лабиринта металлическим крючком с максимальной скоростью при минимальном числе касаний (3 блока × 5 минут работы + 5 минут отдыха).

2. Тренировка дискретного расслабления: ступенчатое снижение изометрического усилия мышц-пронаторов/супинаторов с 80 % от максимальной произвольной силы (МПС) до полного расслабления (0 %) с визуальной обратной связью по ЭМГ-сигналу (3 блока × 5 минут).

3. Сочетанная тренировка: чередование блоков расслабления (5 минут) и прохождения лабиринта (5 минут) без периодов отдыха.

Методы оценки сенсомоторных характеристик мануального навыка. Использовался комплекс методов:

- эффективность навыка оценивалась по количеству ошибок, длине пройденного пути и времени прохождения лабиринта (система видеозахвата Vicon Nexus 2.12);

- пространственная проприоцепция лучезапястного сустава определялась по точности (абсолютной ошибке (АО) в градусах) воспроизведения суставных углов (20°, 50°, 80°) при пронации / супинации кистевого джойстика с использованием реабилитационного устройства Pablo (Tyromotion/Hocoma);
- силовая проприоцепция предплечья оценивалась по точности воспроизведения изометрического усилия (20 %, 50 %, 80 % от МПС) при пронации / супинации неподвижного ручного джойстика по трём схемам (нисходящей, восходящей, дискретной с периодами расслабления) и измерялась в процентном соотношении от значения АО;
- биомеханическая плавность мануального навыка оценивалась по показателю длины дуги спектра скорости (SPARC), алгоритм расчёта которого предложен Balasubramanian S. et al. (2015);
- индекс скоординированности движений TotVar (%), предложенный Biryukova E., Bril B. (2008), рассчитывался как доля общей дисперсии колебаний 7 суставных углов руки, объясняемая первыми двумя главными компонентами (метод PCA, программа MATLAB 2018);
- уровень биоэлектрической активности регистрировали с помощью беспроводной ЭМГ-системы Delsys Trigno (7 мышц: *m.m. pronator teres, supinator, biceps brachii, triceps brachii, deltoideus, trapezius, pectoralis major*), синхронизованной с системой Vicon.

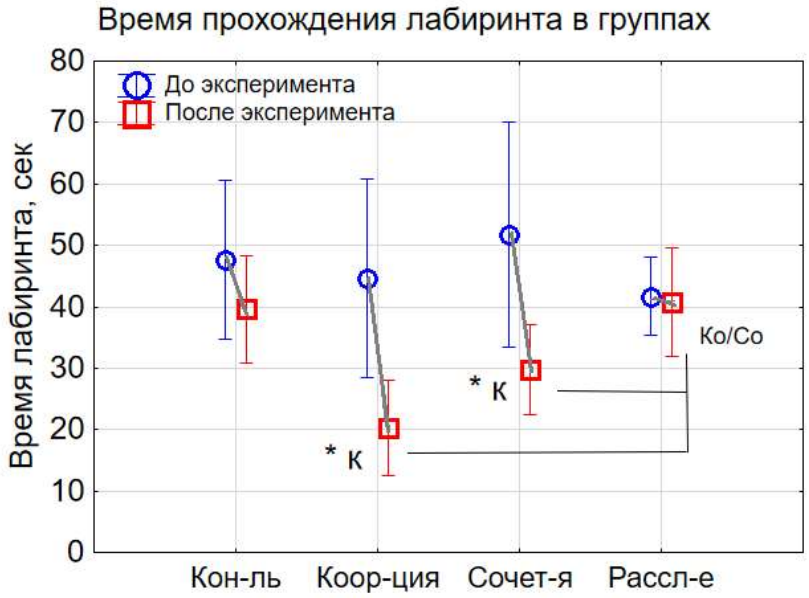
Статистическая обработка. Данные представлены в виде медианы (Me) и межквартильного размаха [25 %-75 %] или среднего арифметического (M) и доверительного интервала (±95 %Д.И.). Использованы критерий Shapiro-Wilk, непараметрический дисперсионный анализ ANOVA Kruskal-Wallis, критерий Mann-Whitney с поправкой Бонферрони, парный критерий Wilcoxon, смешанный двухфакторный дисперсионный анализ ANOVA, корреляционный анализ Spearman. Расчёты выполнены в программе Statistica v12 StatSoft.

Глава 3. Результаты исследования

3.1 Влияние тренировочных программ на эффективность формирования мануального навыка

В группах «Координация» (-62±32 %; $p < 0,01$) и «Сочетанная» (-55±33 %; $p < 0,01$) после тренировочного курса достоверно сократилось количество ошибок при прохождении лабиринта и увеличилась длина пройденного пути (53±64 %; $p < 0,05$ для группы «Координация» и 69±73 %; $p < 0,05$ для группы «Сочетанная»). Время прохождения лабиринта уменьшилось в группах

«Координация» (-53,0±13,3 %; p < 0,001) и «Сочетанная» (-34,3±29,6 %; p < 0,001) (Рисунок 1). В группах «Контроль» и «Расслабление» существенных изменений значений показателей эффективности не произошло. Между улучшением скорости и увеличением длины пройденного пути выявлена высокая корреляция (r = -0,72; p < 0,001), тогда как корреляция улучшения скорости с сокращением количества ошибок была менее выраженной (r = 0,34; p < 0,05), что указывает на одновременное совершенствование точности и скорости мануального навыка. Таким образом, критическим компонентом для улучшения эффективности мануального навыка является координационная составляющая тренировки, тогда как добавление дискретного мышечного расслабления не ухудшает, но и не усиливает этот эффект.



* – p < 0,05 по сравнению с результатами до тренировки по LSD-критерию.
К – p < 0,05 по сравнению с группой «Контроль».
Ко/Со – p < 0,05 по сравнению с группами «Координация» / «Сочетанная» после окончания эксперимента

Рисунок 1 – Время прохождения лабиринта справа налево в группах до и после экспериментального периода тренировок (M±95 %Д.И.).

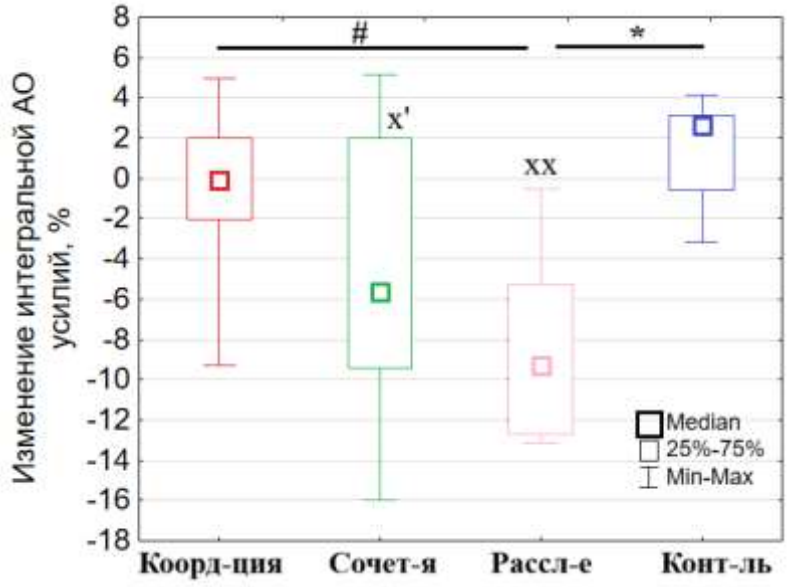
Полученные данные однозначно свидетельствуют о специфичности двигательного обучения: рост эффективности мануального навыка достигается только при его непосредственном повторении. Изолированная тренировка расслабления не обеспечивает положительного переноса на координационный мануальный навык, поскольку задача дискретного расслабления (дискретная, изометрическая, ориентированная на силовой параметр) принципиально отличается от задачи прохождения лабиринта (непрерывная, динамическая, с

акцентом на пространственную координацию). Этот результат согласуется с концепцией специфичности двигательного обучения (Williams A.M., Hodges N.J., 2023).

3.2 Влияние тренировочных программ на проприоцептивные способности

Пространственная проприоцепция (воспроизведение суставных углов). В группе «Координация» снизилось среднее значение показателя АО воспроизведения суставных углов при пронации на 26,4 [-55,6 – -9,4] % ($p = 0,037$). В группе «Сочетанная» наблюдалась тенденция к улучшению точности воспроизведения при супинации джойстика на 20,1 [-54,8 – -6,7] % ($p = 0,059$). В группах «Расслабление» и «Контроль» существенных изменений пространственной проприоцепции не выявлено. Межгрупповых различий в динамике значений этого показателя дисперсионный анализ ANOVA не установил.

Силовая проприоцепция (воспроизведение усилия). Наиболее выраженное повышение точности воспроизведения изометрического усилия отмечалось в группе «Расслабление»: снижение значения интегрального показателя АО на 9 % ($p = 0,008$) привело к большей силовой проприоцепции, чем в группах «Контроль» ($p = 0,013$) и «Координация» ($p = 0,059$). В группе «Сочетанная» зафиксировано умеренное повышение точности усилий на 6 % ($p = 0,059$). Изолированная координационная тренировка не влияла на контроль мышечных усилий (Рисунок 2).



/ * – $p < 0,06$ / 0,05 между группами по критерию Mann-Whitney с поправкой Бонферрони.

x'/xx – $p < 0,1$ / 0,01 – сравнение результатов до и после тренировки в группе по парному критерию Wilcoxon

Рисунок 2 – Изменение значений интегрального показателя АО воспроизведения восемнадцати усилий во всех условиях

Корреляционный анализ выявил отрицательные взаимосвязи между улучшением пространственной и силовой проприоцепции ($r = -0,37$; $p < 0,05$), что свидетельствует о специфичности и разнонаправленности этих адаптаций. После курса тренировок время прохождения лабиринта достоверно коррелировало с показателем пространственной ($r = 0,39$-$0,42$; $p < 0,05$), но не силовой проприоцептивной способности предплечья.

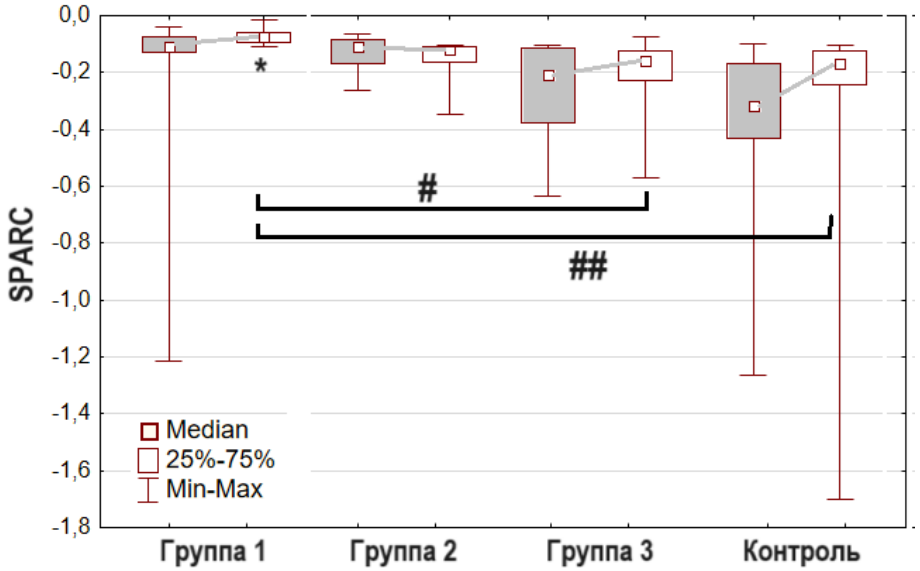
Полученные результаты подтверждают специфичность адаптации проприоцептивной чувствительности разной модальности под влиянием тренировочных программ: координационная тренировка преимущественно увеличивала точность пространственной проприоцепции, тогда как тренировка расслабления – силовую проприоцепцию. Отсутствие корреляций эффективности прохождения лабиринта с силовой проприоцептивной способностью при наличии взаимосвязей эффективности прохождения лабиринта с точностью воспроизведения суставных углов указывает на важную роль повышения пространственной проприоцептивной чувствительности в совершенствовании тонко-координационного навыка (прохождение лабиринта).

3.3 Влияние тренировочных программ на биомеханическую плавность и скоординированность

Значение показателя плавности движения SPARC увеличилось только в группе «Координация» ($p < 0,05$) и после тренировки стало выше, чем в группах «Расслабление» и «Контроль» (Рисунок 3). В группах «Сочетанная» и «Расслабление» значимого изменения показателя SPARC после тренировок не зафиксировано.

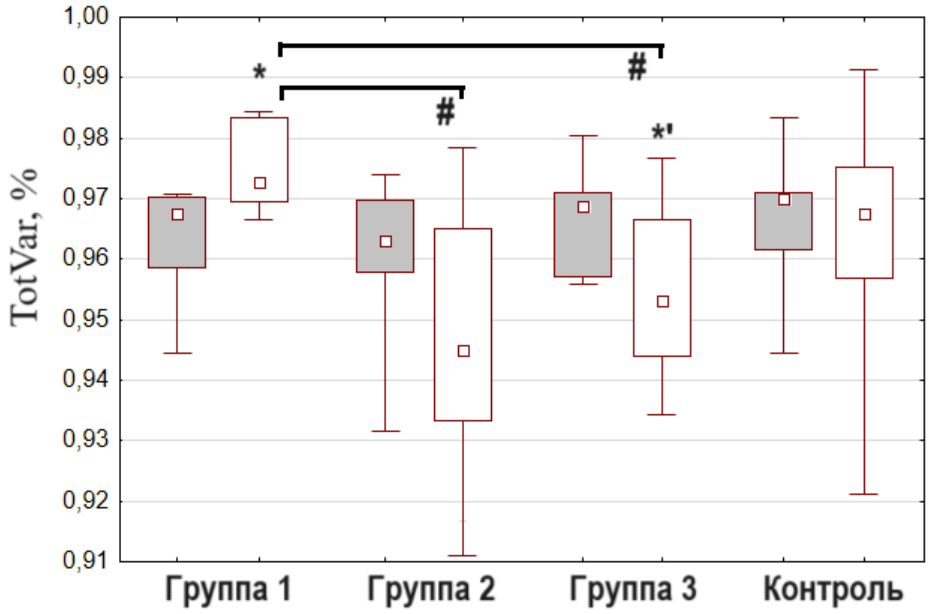
Значение показателя скоординированности суставов руки TotVar выросло только в группе «Координация» ($p < 0,05$) и после тренировки превысило его значения в группах «Сочетанная» и «Расслабление» (Рисунок 4). В группе «Расслабление» отмечена тенденция к снижению индекса TotVar ($p < 0,1$). Следовательно, высокая интегральная эффективность навыка (сокращение количества ошибок и увеличение длины пути) на фоне отсутствия прироста показателей плавности (SPARC) и скоординированности (TotVar) мануального движения в группе «Сочетанная» указывает на то, что тренировка расслабления «навязывает» дискретный стиль управления, препятствующий формированию гладкого автоматизированного паттерна. Аналогичное явление было отмечено при сочетании тренировок силы и выносливости (эффект дивергенции

молекулярных механизмов адаптации) (Murach K.A. et al., 2016). Однако для выяснения этого предположения нужны дополнительные исследования.



Серые прямоугольники – результаты до тренировок, белые прямоугольники – результаты после тренировок.
Группа 1 – «Координация», группа 2 – «Сочетанная», группа 3 – «Расслабление».
/ ## – p < 0,05 / 0,01 по критерию Mann-Whitney с поправкой Бонферрони

Рисунок 3 – Изменение плавности траектории прохождения лабиринта (SPARC) в группах



*'/ * – p < 0,1 / 0,05 по сравнению с результатами до тренировок по критерию Wilcoxon.
Остальные обозначения – как на Рисунке 3

Рисунок 4 – Изменение скоординированности суставов руки (TotVar) при прохождении лабиринта в группах

Время прохождения лабиринта отрицательно коррелировало с показателями SPARC (r = -0,49; p < 0,01) и TotVar (r = -0,50; p < 0,01) (Рисунок 5). Прирост индекса TotVar за курс тренировок коррелировал с уменьшением времени прохождения лабиринта (r = -0,39; p = 0,025) и увеличением длины пройденного пути (r = 0,35; p = 0,041), что указывает на информативность индексов SPARC и TotVar для оценки формирования мануальных навыков.

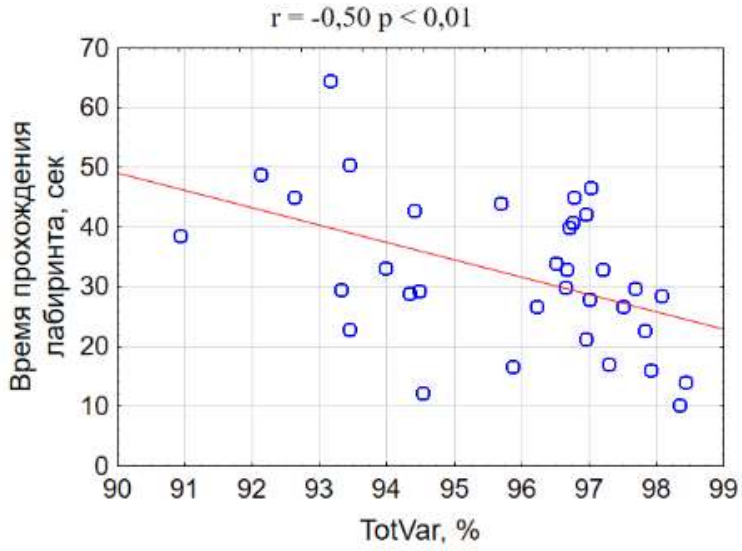


Рисунок 5 – Корреляция Spearman времени прохождения лабиринта с показателем скоординированности TotVar в общей группе после курса тренировок

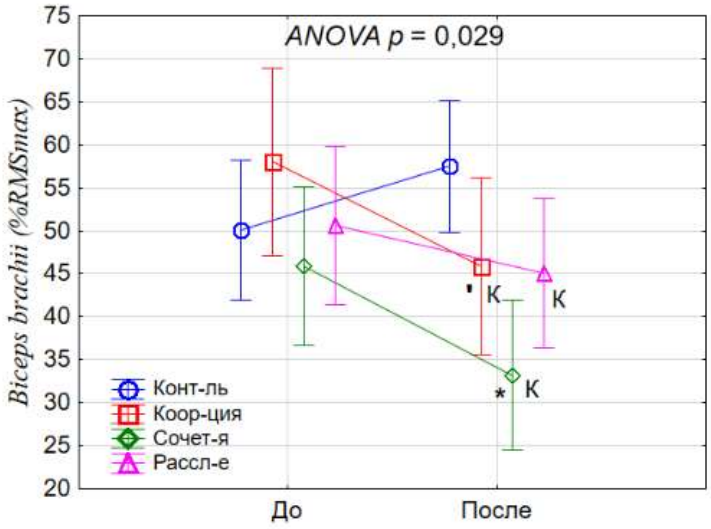
3.4 Влияние тренировочных программ на биоэлектрическую активность мышц руки

Изменения уровня ЭМГ-активности наблюдались исключительно в группах «Координация» и «Сочетанная», тренировавших целевой мануальный навык.

Агонисты. Уровень ЭМГ-активности агониста *m. pronator teres* при пронации снизился в группе «Координация» на 39,3 % (p < 0,01) и в группе «Сочетанная» на 30,8 % (p < 0,01). Уровень активности агонистов при супинации (*m. supinator, m. biceps brachii*) не изменился ни в одной из групп.

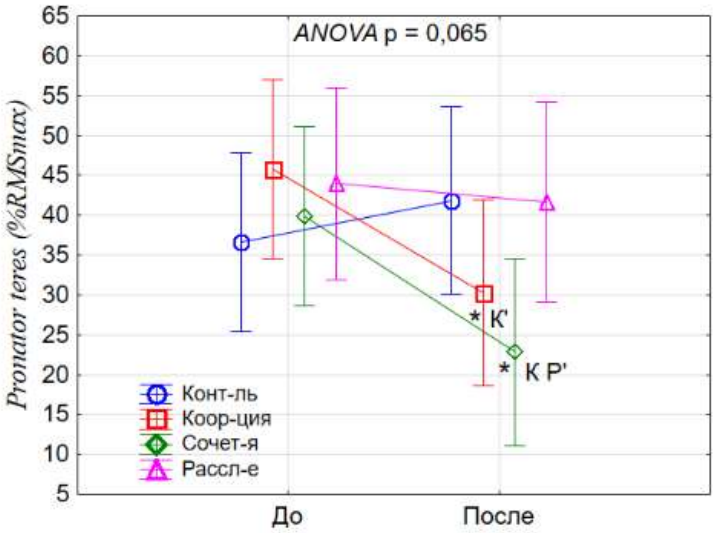
Антагонисты. Уровень активности *m. biceps brachii* при пронации снизился в группах «Координация» (-21,0 %; p < 0,1) и «Сочетанная» (-28,2 %; p < 0,05) (Рисунок 6). Уровень активности антагониста *m. pronator teres* при супинации снизился в группах «Координация» (-25,6 %; p < 0,05) и «Сочетанная» (-37,9 %; p < 0,05) (Рисунок 7), причём это снижение коррелировало с уменьшением числа ошибок в лабиринте (r = 0,41; p < 0,05).

Коэффициент коактивации *m. pronator teres / m. supinator* при супинации снизился и коррелировал с уменьшением количества ошибок (r = 0,39; p < 0,05).



‘ / * – p < 0,1 / 0,05 по сравнению с результатами до тренировки в группе по парному post-hoc LSD-критерию.
К – p<0,05 по сравнению с группой «Контроль» по парному post-hoc LSD-критерию

Рисунок 6 – Активность *m. biceps brachii* при пронации предплечья

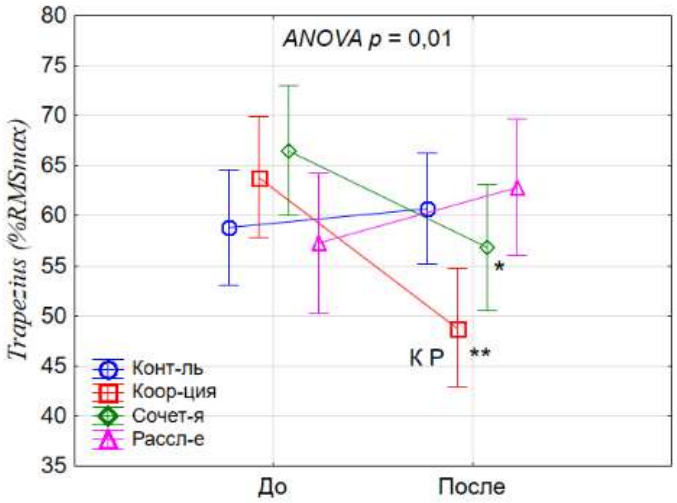


К’/ К – p < 0,1/0,05 по сравнению с группой «Контроль».
Р’ – p < 0,1 по сравнению с группой «Расслабление» по парному post-hoc LSD-критерию

Рисунок 7 – Влияние тренировок на уровень ЭМГ-активности *m. pronator teres* во время супинации

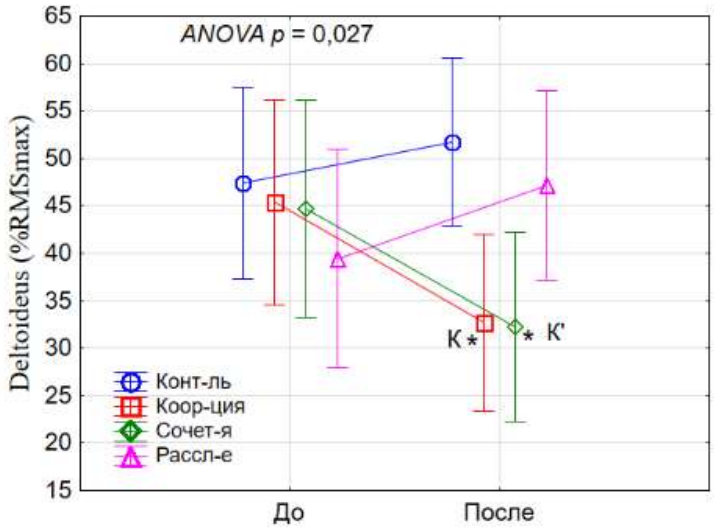
Мышцы-стабилизаторы. Наиболее существенные изменения касались мышц, не являющихся непосредственными генераторами пронации / супинации. Уровень ЭМГ-активности *m. trapezius* снизился при пронации в группах «Координация» (-22,4 %; p < 0,01) и «Сочетанная» (-12,9 %; p < 0,05)

(Рисунок 8). Уровень активности *m. deltoideus* снизился при пронации в группах «Координация» (-30,0 %; $p < 0,05$) и «Сочетанная» (-25,6 %; $p < 0,1$) (Рисунок 9), и это снижение коррелировало с уменьшением количества ошибок и увеличением длины пройденного пути ($r = 0,39$ и $0,37$; $p < 0,05$). Уровень активности *m. pectoralis major* снизился при пронации только в группе «Координация» (-16,6 %; $p < 0,05$). Уровень активности *m. triceps brachii* не изменился. В группе «Расслабление» значимых изменений уровня ЭМГ-активности ни в каких мышцах не выявлено.



** – $p < 0,01$ по сравнению с результатами до тренировки в группе по парному post-hoc LSD-критерию.
Другие обозначения см. на Рисунках 6 и 7

Рисунок 8 – Влияние тренировок на уровень ЭМГ-активности *m. trapezius* в группах (М±95 %Д.И.)



Условные обозначения см. на Рисунках 6 и 7

Рисунок 9 – Влияние тренировок на уровень ЭМГ-активности *m. deltoideus* при пронации предплечья (М±95 %Д.И.)

Таким образом, полученные данные о сниженном уровне ЭМГ-активности функциональных стабилизаторов (*m.m. trapezius, deltoideus, pectoralis major*) указывают на переход от стратегии жёсткой проксимальной стабилизации к энергоэффективному дистально ориентированному управлению при одновременной оптимизации реципрокного взаимодействия агонистов и антагонистов предплечья, выражающийся в снижении коактивации при супинации, что коррелирует с уменьшением количества ошибок при прохождении лабиринта, и в тенденции к её умеренному росту при пронации. Совокупность этих изменений согласуется с концепцией «размораживания» степеней свободы (Бернштейн Н.А., 1947) и концепцией перехода от feedback- к feedforward-контролю (Gribble P.L. et al., 2003; Miall R.C., Wolpert D.M., 1996).

ВЫВОДЫ

1. Наибольшим позитивным влиянием на интегральные показатели эффективности формируемого навыка обладали специфическая координационная тренировка и сочетанная тренировка, включающие двигательное обучение целевого навыка (длина пройденного пути в лабиринте увеличивалась в среднем на 53-69 %, $p < 0,05$, а точность траектории – на 62-55 %, $p < 0,01$). Напротив, изолированное применение упражнений на развитие способности к дискретному расслаблению мышц предплечья не способствовало формированию целевого мануального навыка. Отсутствие положительного переноса обусловлено специфичностью сенсомоторных адаптаций и низким вкладом силовой проприоцептивной чувствительности в эффективность целевого навыка.

2. Адаптация проприоцептивной чувствительности разной модальности под влиянием используемых тренировочных программ является специфичной: пространственная проприоцептивная чувствительность в большей мере увеличивалась под влиянием тонко-координационной и сочетанной тренировки (точность воспроизведения углов пронации / супинации кистевого джойстика повышалась в среднем на 20,1-26,4 %; $p < 0,05$), а развитие мышечного расслабления не оказывало влияния на пространственную проприоцептивную чувствительность. Эффективность навыка (скорость прохождения лабиринта) после курса тренировок коррелировала ($r = 0,36$-$0,42$; $p < 0,05$) с пространственной проприоцептивной способностью, но не с силовой проприоцепцией, что свидетельствует о роли повышения пространственной проприоцептивной чувствительности в совершенствовании тонко-координационного навыка.

3. Силовая проприоцептивная способность в наибольшей мере совершенствуется под влиянием тренировки дискретной релаксации мышц (точность воспроизведения всех усилий повысилась в среднем на 56 %; $p < 0,01$), умеренные позитивные сдвиги выявлены под влиянием сочетанного использования упражнений на мышечное расслабление и на тонко-координационную моторику (точность воспроизведения всех усилий повысилась в среднем на 31 %; $p < 0,06$). Изолированная тонко-координационная тренировка не влияла на контроль мышечных усилий.

4. Значения показателей биомеханической плавности (SPARC) и скоординированности движений в суставах верхней конечности (TotVar) возрастали только после курса тонко-координационной тренировки, что подтверждает её ключевую роль в формировании гладкого, непрерывного двигательного паттерна. В группе изолированной тренировки дискретного мышечного расслабления, напротив, наблюдалось снижение суставной скоординированности (TotVar), что может свидетельствовать об интерференции между двумя типами двигательного обучения. Выявленные отрицательные корреляции показателей SPARC и TotVar с временем прохождения лабиринта ($r = -0,49$ – $-0,50$; $p < 0,01$) обосновывают использование этих индексов как маркеров эффективности и сформированности мануального навыка. Повышенная плавность навыка (SPARC) была взаимосвязана с количеством ошибок воспроизведения суставных углов ($r = -0,34$ – $-0,37$; $p < 0,05$), что позволяет рассматривать проприоцептивный контроль пространственной точности как один из механизмов, обеспечивающих непрерывность и сглаженность траектории при выполнении мануального навыка.

5. Адаптационные изменения уровня миоэлектрической активности под влиянием тренировок носили специфический характер и наблюдались исключительно в группе, тренировавшей целевой мануальный навык – прохождение лабиринта. Включение в тренировку упражнений на развитие дискретного мышечного расслабления не оказало дополнительного положительного влияния на ЭМГ-показатели. Совершенствование тренируемого навыка сопровождалось снижением уровня ЭМГ-активности мышц-стабилизаторов, обеспечивающих положение и стабилизацию плеча, лопатки и всего плечевого пояса (*m. trapezius* – на 12-22 %; $p < 0,05$-$0,01$; *m. deltoideus* – на 25-30 %; $p < 0,05$-$0,01$; *m. pectoralis major* – на 17-21 %; $p < 0,05$), снижением уровня избыточных активностей антагонистов при пронации (*m. biceps brachii* – на 21-28 %; $p < 0,1$-$0,05$) и супинации (*m. pronator teres* – на 26-38 %; $p < 0,05$), а также агониста при пронации (*m. pronator teres* – на 31-39 %; $p < 0,01$). Регулируемое снижение уровня мышечных активностей отражает

переход от менее эффективного (по данным корреляционного анализа) контроля с избыточной жёсткостью суставов к дифференцированному и прогностическому управлению, обеспечивающему точность и экономичность дистальных движений верхней конечности.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты диссертации, свидетельствующие об эффективности разработанной методики тренировки способности к расслаблению мышц, рекомендуем использовать в тренировочном процессе спортсменов, занимающихся сложно-координационными видами спорта (теннис, бадминтон, фехтование, скалолазание, единоборства), в качестве дополнительной меры для совершенствования точности контроля мышечных усилий.
2. В клинической практике нейрореабилитации пациентов рекомендуем использовать выявленные в исследовании профили биоэлектрической активности мышц и биомеханические показатели плавности и скоординированности мануальных движений (SPARC и TotVar) практически здоровых лиц в качестве референтных значений для оценки качества восстановления мануальных движений у пациентов с неврологическими нарушениями (после инсульта, болезни Паркинсона).

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Иконникова Е.С., Бобров П.Д., Мельников А.А., Васенина В.Г. Влияние тренировки дискретного расслабления мышц предплечья на эффективность формирования мануального навыка // Современные вопросы биомедицины. – 2024. – Т. 8. – № 2. – DOI : 10.24412/2588-0500-2024_08_02_9 (ВАК, К2).
2. Иконникова Е.С., Мельников А.А., Люкманов Р.Х., Клочков А.С., Супонева Н.А. Влияние тренировки дискретного расслабления мышц руки и тонко-координационной тренировки на проприоцептивный контроль // Физиология человека. – 2024. – Т. 50. – № 3. – С. 41-55. – DOI : 10.31857/S0131164624030047 (Белый список У3, Scopus).
3. Мельников А.А., Иконникова Е.С., Люкманов Р.Х., Супонева Н.А. Проприоцептивный контроль мышц верхней конечности у спортсменов-самбистов // Журнал медико-биологических исследований. – 2024. – Т. 12. – № 3. – С. 329-337. – DOI : 10.37482/2687-1491-Z203 (ВАК, К2).
4. Иконникова Е.С., Мельников А.А., Бобров П.Д., Люкманов Р.Х., Супонева Н.А. Влияние двигательного обучения в сочетании с тренировкой дискретного расслабления на биоэлектрическую активность мышц во время тонко-координационного мануального навыка // Физиология человека. – 2026. – Т. 52. – № 3 (Белый список У1, Scopus).

Статьи в сборниках материалов конференций

5. Ivleva E.S., Lukmanov R.H., Melnikov A.A. Influence of arbitrary muscle relaxation on the effectiveness of motor skill training // Proceedings of XV Annual International Conference for Students and Young Researchers «Modern University Sport Science»: Publication of scientific abstracts. Moscow, 31 марта – 02 апреля 2021 года : РГУФК (ГЦОЛИФК)», 2021. – P. 91-93.
6. Ивлева Е.С., Люкманов Р.Х., Котов-Смоленский А.М., Мельников А.А. Влияние тренировки способности к расслаблению мышц на эффективность формирования нового двигательного навыка // Новые подходы к изучению проблем физиологии экстремальных состояний: посвящённой памяти Инесы Бенедиктовны Козловской и приуроченной к году науки и технологий.

Москва, 28 июня – 01 июля 2021 года. – Москва: Институт медико-биологических проблем РАН, 2021. – С. 38.

7. Иконникова Е.С., Мельников А.А. Биомеханическая характеристика нового манипулятивного действия кистью руки // Motor control 2022 : Сборник тезисов IX Российской с международным участием конференции по управлению движением, посвящённой 95-летию со дня рождения И.Б. Козловской (Казань, 2-4 июня, 2022 г.). Казань: Изд-во «Бриг», 2022. – С. 134.

8. Иконникова Е.С., Мельников А.А., Люкманов Р.Х. Влияние произвольного мышечного расслабления на эффективность обучения новым двигательным навыкам // Нейронаука для медицины и психологии: XVIII Международный междисциплинарный конгресс. Судак, Крым, Россия; 30 мая – 10 июня 2022 г. : Труды Конгресса. МАКС Пресс, 2022. – С. 149-150.

9. Иконникова Е.С., Мельников А.А., Люкманов Р.Х. Эффекты тренировки дискретного расслабления и тонко-координационной тренировки мышц предплечья на скоординированность и плавность мануального навыка // Сборник статей II открытой научно-практической конференции, посвящённой 10-летию XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи, 100-летию Великолукского уездного комитета по физической культуре. Великие Луки, 21 марта 2024 года. – Великие Луки : ВГАФКиС, 2024. – С. 66-72.

10. Мельников А.А., Иконникова Е.С., Люкманов Р.Х. Влияние координационной и дифференцированной силовой тренировки пронаторов и супинаторов предплечья на их проприоцептивную чувствительность // Сборник тезисов XXIV съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. Санкт-Петербург, 11-15 сентября 2023 года. – Санкт-Петербург: ООО «Издательство ВВМ», 2023. – С. 459-460.

11. Мельников А.А., Иконникова Е.С., Люкманов Р.Х. Эффект тренировки силового расслабления на формирование тонко-координационного манипулятивного навыка // Материалы XI Международного конгресса. Санкт-Петербург, 30-31 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, 2024. – С. 397-402.

12. Мельников А.А., Иконникова Е.С. Проприоцептивная способность как важный компонент подготовленности спортсменов // Проблемы современной морфологии человека: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 95-летию кафедры анатомии ГЦОЛИФК и 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки

РФ, члена-корреспондента РАМН, профессора Б.А. Никитюка, 28-29 сентября 2023 г. (РУС «ГЦОЛИФК») Москва., 2024. – С. 29-33.

13. Мельников А.А., Иконникова Е.С. Точность воспроизведения усилий во время сокращения и расслабления мышц предплечья у спортсменов-борцов // Физическая культура и спорт. Олимпийское образование : Материалы международной научно-практической конференции. Краснодар, 12-13 октября 2023 года. – Краснодар : Издательство «Экоинвест», 2023. – С. 261-264.