

УДК 612.811.4;612.812

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИРОВКИ ДИСКРЕТНОГО РАССЛАБЛЕНИЯ МЫШЦ РУКИ И ТОНКО-КООРДИНАЦИОННОЙ ТРЕНИРОВКИ НА ПРОПРИОЦЕПТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ

© 2024 г. Е. С. Иконникова^{1, 2}, А. А. Мельников^{2, *}, Р. Х. Люкманов¹,
А. С. Клочков¹, Н. А. Супонева¹

¹ФГБНУ Научный центр неврологии, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО Российский университет спорта "ГЦОЛИФК", Москва, Россия

*E-mail: meln1974@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 03.03.2024 г.

Принята к публикации 06.03.2024 г.

Проприоцепция вносит важный вклад в регуляцию скоростных, силовых и пространственных параметров движений, определяя уровень владения двигательными навыками. Однако эффективность различных тренировочных подходов в отношении произвольного проприоцептивного контроля целевых мышц изучена недостаточно. В данной работе исследовали эффективность трех видов манипулятивных тренировок: 1) тонкой координационной, 2) дискретного мышечного расслабления и 3) их сочетания в отношении точности воспроизведения: а) углового отклонения джойстика от вертикали и б) статических мышечных усилий в процессе пронации и супинации джойстика. В исследовании приняли участие 40 молодых (18-35 лет), физически активных добровольцев, которые рандомизированно составили 4 группы по 10 чел.: "Контроль" (отсутствие тренировок), "Координация" (тренировка прохождения аналога щелевого лабиринта тонким щупом), "Дискретное расслабление" (тренировка дискретного мышечного расслабления пронаторов и супинаторов предплечья), "Сочетанная" (совместная тренировка прохождения лабиринта и дискретного расслабления). До и после тренировок ($n = 10$) оценивали: 1) точность воспроизведения отклонения кистевого джойстика от вертикали на 20, 50, 80 град и 2) точность воспроизведения степени постепенно развиваемого изометрического сокращения в нисходящем, восходящем направлениях и дискретного достижения какого-либо уровня (20, 50 и 80% от максимального усилия) путем пронации/супинации кистевого джойстика. Установлено, что координационная тренировка увеличивала длину проходимого пути лабиринта за 3 мин при меньшем количестве ошибок, а также повышала проприоцептивную точность воспроизведения угла отклонения джойстика в 20 град. В группе "Дискретное расслабление" после тренировки снизились средний модуль ошибок воспроизведения нисходящего, восходящего и дискретного усилия при супинации, а также средний модуль ошибок воспроизведения нисходящего, восходящего и дискретного усилий при пронации предплечья. При этом каких-либо изменений точности воспроизведения угловых положений джойстика в данной группе не обнаружено. В группе "Сочетанная" тренировки привели к увеличению точности воспроизведения восходящих и нисходящих усилий при пронации, а также точности нисходящих усилий при супинации предплечья. Кроме того, в этой группе выявлено снижение модуля ошибки при воспроизведении наклона джойстика на 50 град путем супинации. Корреляционный анализ не выявил положительных связей между тренировочными изменениями проприоцептивного контроля разной модальности. Таким образом, используемые тренировочные воздействия на мышцы предплечья оказывают специфическое влияние на проприоцептивный контроль мышечного усилия и пространственного положения суставов руки. Высокая эффективность тренировки дискретного расслабления в отношении точности произвольных усилий позволяет рекомендовать ее использование с целью повышения уровня владения двигательными навыками руки.

Ключевые слова: проприоцептивная точность, силовая проприоцепция, проприоцепция положения сустава, манипулятивная координация, тренировка дискретного расслабления.

DOI: 10.31857/S0131164624030047, EDN: BUTEZX

Регуляция произвольных движений рук, а также двигательное обучение обеспечиваются нейрональными механизмами прямой и обратной связи, ключевую роль в которых играет частично осознаваемая сенсорная информация, поступающая от проприорецепторов мягких тканей и суставов. Интеграция проприоцептивной и другой сенсорной информации в центральной нервной системе (ЦНС) обуславливает эффективное, то есть наименее энергозатратное и при этом прецизионное и быстрое выполнение движений с точной регуляцией соответствующего напряжения и расслабления мышц [1, 2–4].

В настоящее время для совершенствования спортивных навыков, а также для реабилитации неврологических двигательных нарушений в руках преимущественно используются различные методы координационной и силовой тренировки, а также упражнения, направленные на увеличение произвольности сенсомоторного контроля напряжения мышц: например, для оптимальной коактивации или реактивации мышц-агонистов и антагонистов [1].

Вместе с тем, в ряде работ показано, что целевое снижение мышечного напряжения по сравнению с его увеличением — это не менее сложный в управлении процесс, активно задействующий механизмы нейропластичности [5, 6]. Установлено, что во время дискретного расслабления мышц плеча время реакции меньше, однако точность развиваемого усилия всегда ниже, чем при генерации такого же усилия этой мышцей [7–8]. Результаты исследований убедительно показывают, что эффективное управление мышцами у спортсменов и достижение высоких результатов в спорте тесно связаны со способностью к расслаблению и точностью снижения усилия мышц [5, 9]. В связи с этим, особый интерес представляют методы тренировки целенаправленного расслабления мышц, в несоизмеримо меньшей степени представленные в рутинной спортивной или нейрореабилитационной практике. Кроме того, работы, посвященные изучению роли проприоцептивного контроля в течение тренировок с использованием упражнений на расслабление, отсутствуют.

Целью данной работы было сопоставить эффективность тренировки дискретного (ступенчатого) мышечного расслабления с курсом тонко-координационной тренировки мышц предплечья и их сочетанного воздействия на проприоцептивный контроль.

Для оценки проприоцептивного контроля тренируемых мышц авторы настоящей статьи использовали показатели точности активного воспроизведения угла отклонения кистевого джойстика от вертикали, которое характеризует чувство пространственного положения пред-

плечья (пространственная проприоцепция), в большей мере, зависящее от контроля суставных углов в локтевом и лучезапястном суставах, и точности активного воспроизведения статического усилия при пронации и супинации неподвижного кистевого джойстика (или силовая проприоцепция) [4].

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 40 здоровых добровольцев (из них — 20 мужчин) в возрасте 18–35 лет, с правосторонним мануальным профилем, определенного при помощи опросника М. Аннет, которые рандомизированно составили 4 группы по 10 чел. Группа "Контроль" ($n = 10$, 4 муж/6 жен, возраст — 21.7 ± 1.3 лет) не выполняла никаких специальных тренировочных воздействий на мышцы рук в течение исследования. Группа "Координация" ($n = 10$, 5 муж/5 жен, возраст — 24.8 ± 3.8 лет) проходила курс координационной тренировки тонкой моторики правой руки. Группа "Дискретное расслабление" ($n = 10$, 7 жен/3 муж, возраст 21.5 ± 1.8 лет) тренировалась по методике произвольного дискретного расслабления мышц-пронаторов и супинаторов правого предплечья. Группа "Сочетанная" ($n = 10$, 3 жен/7 муж, возраст 23.9 ± 3.7 лет) тренировалась по методике сопряженного воздействия на мышцы предплечья, включавшей прохождение лабиринта и произвольное дискретное расслабление пронаторов и супинаторов предплечья.

Программа тренировок. Курс тренировок в экспериментальных группах содержал 10 занятий продолжительностью 30 мин каждое в течение двух недель. Все занятия и тестирования проходили в индивидуальном формате в специализированном кабинете. Во время тестирования и тренировок испытуемые сидели на стуле без спинки за столом, левая рука располагалась на столе в расслабленном положении ладонью вниз, правая рука выполняла тренировочные задания. Выполнение тренировочных и тестовых заданий осуществляли при постоянном контроле исследователя, который располагался непосредственно рядом с испытуемым и следил: 1) за позой тела и положением рук испытуемого, 2) выполнением задания, осуществляя комментарии в случае необходимости.

1. Координационные тренировки тонкой моторики правой руки заключались в выполнении упражнения "Лабиринт" (рис. 1), в течение которого испытуемый непрерывно проводил металлическим крючком (внутренний диаметр кольца — 23 мм) вдоль проволочного лабиринта (длина 82 см, толщина 3 мм) в обоих направлениях в течение 5 мин.

Основными задачами для добровольца в этом упражнении были максимальная скорость прохождения лабиринта и наименьшее количество касаний крючком – ошибок. В случае касания крючка о лабиринт звучал сигнал об ошибке и движение крючка останавливали до окончания сигнала с последующим возобновлением упражнения. Общее время тренировки составляло 30 мин и включало 3 блока по 10 мин: 5 мин упражнение с лабиринтом и 5 мин отдыха.

2. Тренировку дискретного расслабления мышц-пронаторов и супинаторов правого предплечья проводили с использованием неподвижного деревянного джойстика для реализации изометрического сокращения (рис. 2).

Испытуемый, удерживая кистью джойстик, выполнял изометрическое сокращение мышц-пронаторов или супинаторов предплечья с последующим постепенным расслаблением до заданного уровня, ориентируясь на зрительную обратную связь по электромиограмме (ЭМГ). Данный методический подход для тренировки расслабления мышц рук и ног был апробирован в работах [7, 8]. Степень мышечного напряжения определяли с помощью регистрации накожной огибающей ЭМГ (АПК "Траст-М", "Neurocore", Москва) в области проекции круглого пронатора предплечья (для оценки пронации) и наружной головки бицепса плеча (для оценки супинации).

На первом этапе производили регистрацию максимальной амплитуды ЭМГ с измерением в микровольтах на фоне супинации и пронации, которая отображалась в процентах от максимального произвольного силы (МПС) и представля-

лась на мониторе в виде столбика с цифровым значением. Затем участник создавал усилие, равное 80% от МПС с помощью изометрического сокращения мышц-пронаторов или супинаторов предплечья, контролируя его с помощью зрительной обратной связи. По команде исследователя испытуемый последовательно снижал уровень сокращения с 80 до 60%, до 40%, до 20% и до полного расслабления (0% от МПС). Время удержания усилия на каждом уровне составляло около 3 с. Период тренировки дискретного расслабления мышц-пронаторов составлял 150 с, супинаторов — 150 с, далее следовал период отдыха продолжительностью 5 мин. Таким образом, в течение тренировки испытуемые выполняли 3 блока по 10 мин: 2.5 мин — пронация, 2.5 мин — супинация, 5 мин — отдых.

3. Сочетанная тренировка содержала чередующиеся блоки упражнений по "Дискретному расслаблению" (5 мин) и "Координации" (5 мин) без периодов отдыха.

Методы оценки проприоцептивной точности. Тестирование проприоцептивной точности, а также контрольное прохождение лабиринта проводили дважды: за 1 день до начала тренировочного цикла и на следующий день после окончания тренировок.

Оценка эффективности тренировок в совершенствовании прохождения лабиринта. Эффективность тренировок оценивали по количеству

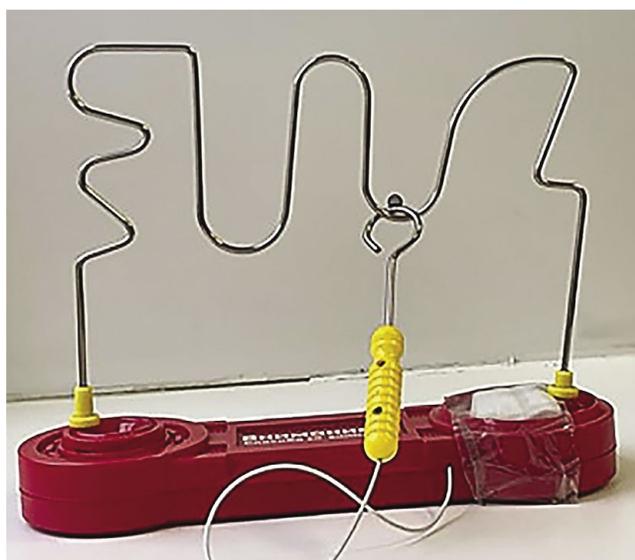


Рис. 1. Лабиринт, используемый для мануальной координационной тренировки в группе "Координация".



Рис. 2. Ручной джойстик, используемый для тренировки дифференцированного расслабления мышц-пронаторов и супинаторов предплечья.

ошибок во время прохождения лабиринта и длине пути лабиринта, пройденного за 3 мин. Ошибкой считали касание крючком железного лабиринта, которое сопровождалось звуковым сигналом и кратковременной остановкой движения для возобновления (после окончания звука) бесконтактного положения крючка в лабиринте. Пройденный за 3 мин путь лабиринта измеряли с точностью до 3 мм. При первом посещении испытуемый только знакомился с удержанием и вращением крючка вне лабиринта.

Оценка точности воспроизведения уровня изометрического сокращения при пронации и супинации предплечья (силовой проприоцепции). Точность воспроизведения изометрического усилия тестировали отдельно для супинации и пронации правого предплечья. Испытуемому давали инструкцию оказывать вращающее усилие заданного уровня на неподвижный кистевой джойстик. Воспроизведение мышечного усилия пронации и супинации предплечья проводили по трем отдельным схемам (после определения МПС): 1) точность воспроизведения усилия в нисходящем направлении, (дискретное расслабление): 0% (исходное усилие) → 80% → 50% → 20% МПС; 2) точность воспроизведения усилия в восходящем направлении без периодов расслабления (дискретное изометрическое сокращение): 0% → 20% → 50% → 80% МПС; 3) точность воспроизведения дискретного изометрического сокращения в восходящем направлении с периодами расслабления (3 с): 0% → 20% → 0% → 50% → 0% → 80% МПС.

Сначала испытуемый воспроизводил тестируемую схему развития усилия с открытыми глазами и зрительной обратной связью по ЭМГ с заданием запомнить заданные уровни мышечного усилия. Время удержания усилия задавалось исследователем и составляло 3 с. Далее испытуемый закрывал глаза и воспроизводил тестируемую схему развития усилия в течение трех попыток, из которых для анализа рассчитывали среднее значение.

Оценка точности активного воспроизведения угла отклонения кистевого джойстика от вертикали при пронации и супинации предплечья (пространственной проприоцепции). Во время тестирования испытуемый находился в таком же положении, как и при тестировании уровня изометрического усилия. При тестировании был использован джойстик из реабилитационного устройства "Pablo" ("Tyromotion", Австрия). Угол отклонения джойстика от вертикали во фронтальной плоскости во время пронации и супинации предплечья определяли встроенным в джойстик гониометром.

На первом этапе испытуемый с открытыми глазами супинировал джойстик последовательно: на 20, 50 и 80 град, используя зрительную обратную связь на экране монитора, и запоминал

ощущения в руке на фоне заданного угла наклона джойстика. На втором этапе проводили трехкратное воспроизведение углового отклонения джойстика от вертикали путем супинации с закрытыми глазами, из которых для дальнейшего анализа рассчитывали среднее значение. Ту же процедуру проводили для оценки пространственной проприоцепции пронации.

Методы обработки данных. Точность воспроизведения заданного уровня мышечного усилия оценивали с помощью показателя — модуль ошибки (МО, %), равного модулю разницы целевого и воспроизводимого усилия, рассчитанного по формуле:

$$МО = [F_{ц\%} - F_{в\%}], \quad (1)$$

где МО — модуль ошибки в %; $F_{ц\%}$ — целевой уровень усилия в %; $F_{в\%}$ — воспроизводимый уровень усилия с закрытыми глазами в %. Например, $F_{ц\%} = 80\%$; $F_{в\%} = 85\%$, тогда $МО\ 80\% = [80 - 85] = [-5] = 5\%$. Показатель МО рассчитывали для уровней 80, 50, 20% по всем трем схемам развития усилия.

Точность воспроизведения угла отклонения джойстика от вертикали для пронации и отдельно для супинации оценивали с помощью показателя — модуль ошибки (МО, град), равного модулю разницы целевого и воспроизводимого угла отклонения джойстика, рассчитанного по формуле:

$$МО = [F_{ц(град)} - F_{в(град)}], \quad (2)$$

где МО — модуль ошибки в град; $F_{ц}$ — целевой угол в град; $F_{в}$ — воспроизводимый угол с закрытыми глазами в град. Например, $F_{ц} = 80$ град; $F_{в} = 85$ град, тогда $МО = [80 - 85] = [-5] = 5$ град. Данный показатель рассчитывали для трех углов наклона джойстика, равных 80, 50, 20 град, а также определяли *средний* МО для них же — отдельно для пронации и супинации.

Статистика. По данным критерия *Shapiro-Wilk* значительная часть показателей имела ненормальное распределение, поэтому они представлены как медиана (Me) и межквартильный размах [25%-75%]. Различия между всеми группами ($n = 4$) определяли с помощью непараметрического однофакторного анализа *Kruskal-Wallis ANOVA*. Парные сравнения были выполнены с помощью критерия *Mann-Whitney*. Значение p парных сравнений представлено с учетом поправки Бонферрони на 4 группы. Статистически значимыми считали различия при $p < 0.05$, $p < 0.1$ рассматривали как тенденцию. Значимость изменений показателей после тренировочного периода в группах был определена с помощью парного критерия *Wilcoxon*. Для всех показателей определяли величину изменения за тренировочный период относительно исходного уровня (Δ). Корреляционный анализ провели с изменениями показателей за тренировочный период (Δ) с помощью ранговой корреляции *Spear-*

man (r). Расчеты были выполнены в программе "Statistica v12, Statsoft".

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность тренировочных программ в совершенствовании прохождения лабиринта. У испытуемых, тренировка которых включала прохождение лабиринта (группы "Координация" и "Сочетанная"), произошло снижение количества ошибок во время прохождения лабиринта ($p < 0.01$ для обеих групп, рис. 3) и длины пройденного пути ($p < 0.05$ для обеих групп, рис. 4). При этом в группах "Координация" и "Сочетанная" длина проходимого пути после тренировочного курса стала больше, а величина ошибок — меньше, чем в группах "Контроль" и "Силовое расслабление". В группах "Контроль" и "Силовое расслабление" эффективность прохождения лабиринта за период эксперимента не изменилась.

Влияние тренировочных программ на точность воспроизведения углового отклонения джойстика от вертикали. В группе "Координация" выявлено существенное снижение среднего МО воспроизведения трех угловых положений джойстика: на 1.7 град ($p = 0.037$) при пронации (табл. 1), в основном за счет уменьшения МОпрон.20 град (-3.5 град, $p = 0.085$).

В группе "Сочетанная" установлено снижение МОсуп.50 град (-6 град, $p = 0.015$) и тенденция к уменьшению среднего МОсуп (-3.3 град, $p = 0.059$).

В группе "Контроль" выявлена тенденция к уменьшению МОпрон.50 град (-4 град, $p = 0.07$).

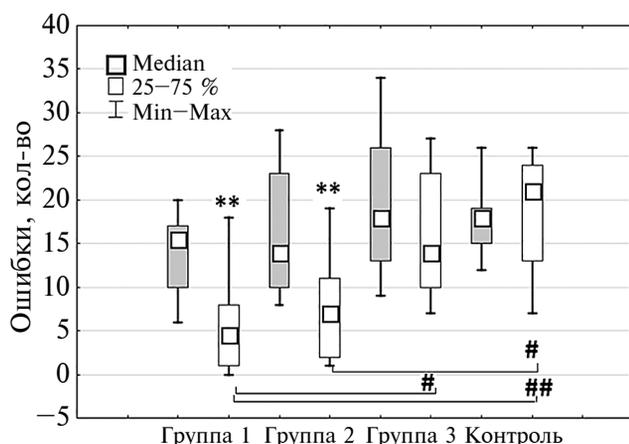


Рис. 3. Количество ошибок во время прохождения "Лабиринта" в группах до и после эксперимента (медиана \pm 25–75% \pm минимальное и максимальное значение).

Серые прямоугольники — до, белые прямоугольники — после эксперимента. Группа 1 — "Координация", группа 2 — "Сочетанная", группа 3 — "Силовое расслабление".

Существенных различий в изменениях точности воспроизведения угловых положений джойстика путем супинации или пронации предплечья за период тренировок между группами с помощью метода ANOVA не выявлено (табл. 1).

Влияние тренировочных программ на точность воспроизведения уровня изометрического сокращения при супинации

Точность супинации нисходящего усилия. В группе "Координация" не установлено существенных изменений МОсуп с усилием 80, 50 и 20% в нисходящем порядке (табл. 2). В группе "Сочетанная" выявлена позитивная тенденция к снижению среднего МОсуп ($-6,3\%$, $p < 0.1$) за счет снижения МОсуп.50 Э (-8% , $p < 0.05$). В группе "Дискретное расслабление" установлено снижение МОсуп.80 (-27% , $p < 0.05$), МОсуп.50 (-17% , $p < 0.01$) и среднего МО для всех усилий (-14.0% , $p < 0.01$). Причем величины МОсуп.50 ($p < 0.01$) и МОсуп.80 ($p < 0.05$) после тренировочного курса стали ниже, чем в "Контроле".

Тренировка дискретного расслабления была более эффективной в снижении МОсуп.50 ($p < 0.05$), а также среднего МОсуп ($p < 0.05$) по сравнению с координационной тренировкой.

Точность супинации восходящего усилия. В группе "Координация" точность воспроизведения усилий при супинации на 80, 50 и 20% от МПС в восходящем порядке не изменилась (табл. 2).

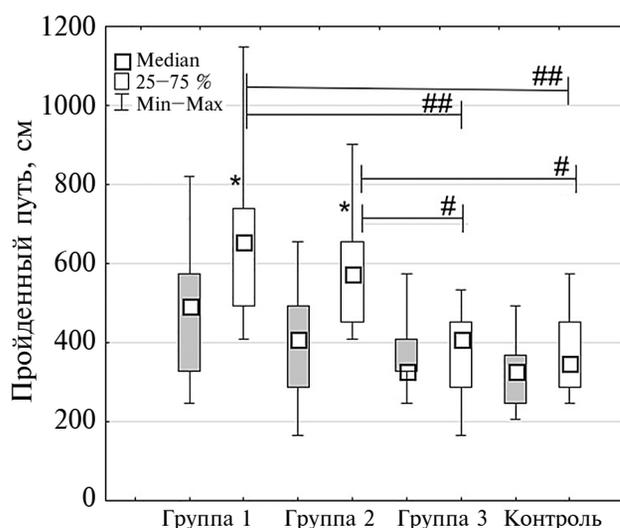


Рис. 4. Пройденный путь лабиринта за 3 мин в группах до и после курса тренировок (медиана \pm 25–75% \pm минимальное и максимальное значение).

Серые прямоугольники — до, белые прямоугольники — после эксперимента. Группа 1 — "Координация", группа 2 — "Сочетанная", группа 3 — "Силовое расслабление". * — $p < 0.05$ по сравнению с До тренировки по парному критерию Вилкоксона. #/## — $p < 0.05/0.01$ по сравнению со значениями в группе после тренировки по критерию Манна-Уитни с поправкой Бонферрони.

Таблица 1. Показатели точности воспроизведения угловых отклонений джойстика от вертикали при пронации и супинации предплечья в группах до и после тренировочного курса (Me [25%–75%])

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	ANOVA K-W, p
	Координация	Сочетанная	Силовое расслабление	Контроль	
Модуль ошибки угловых отклонений при супинации джойстика					
МОсуп.20 град (град). До	5 [3–7]	10.5 [4.0–15.0]	4 [3–7]	5 [2–5]	0.309
МОсуп.20 град (град). После	5.5 [2.0–11.0]	8.5 [6.0–13.0]	7.0 [2.0–8.0]	9 [5–11]	0.496
ΔМОсуп.20 град (град)	–0.5 [–3.0–6.0]	–2.0 [–3.0––1.0]	0.0 [–1.0–2.0]	4.0 [–1.0–5.0]	0.370
МОсуп.50 град (град). До	6.5 [3.0–12.0]	9.5 [6.0–17.0]	5.0 [4.0–13.0]	10 [6–11]	0.506
МОсуп.50 град (град). После	2.5 [1–4]	5.5 [3.0–9.0]*	2 [1.0–7.0]	6 [4–6.0]	0.447
ΔМОсуп.50 град (град)	–3.5 [–8.0––1.0]	–6 [–8––1]	–1 [–2–0]	–2 [–5–3]	0.421
МОсуп.80 град (град). До	8 [5–12]	8 [6–14]	5 [3–14]	5 [2–15]	0.741
МОсуп.80 град (град). После	5 [1–16]	7 [4–9]	6 [3–7]	4 [1–7]	0.686
ΔМОсуп.80 град (град).	–3 [–10–2]	–1 [–6–1]	–1 [–4–3]	0 [–11–5]	0.964
Средний МОсуп (град). До	7.2 [5.0–9.7]	10.2 [7.0–14.3]	5.3 [4.0–10.7]	9.0 [4.3–11.3]	0.384
Средний МОсуп (град). После	4.5 [3.7–10.0]	7.7 [6.0–11.3]#	4.3 [3.7–9.0]	5.7 [5.0–7.3]	0.548
ΔСредний МОсуп (град)	–3.3 [–5.3–1.7]	–3.3 [–5.7––0.7]	–0.7 [–1.7–2.3]	0.7 [–3.7–2.3]	0.574
Модуль ошибки угловых отклонений при пронации джойстика					
МОпрон.20 град (град). До	7 [5–1]	8 [4–12]	3 [2–4] ¹	4 [2–6]	0.012
МОпрон.20 град (град). После	4 [3–7.0]#	9 [6–11]	3 [2–8]	3 [2–7]	0.050
ΔМОпрон.20 град (град).	–3.5 [–6.0–0]	1 [–4–6]	0 [–2–5]	0 [0–2]	0.224
МОпрон.50 град (град). До	6 [3–9]	5 [3–13]	8 [5–8]	8 [5–10]	0.639
МОпрон.50 град (град). После	4 [2–8]	3.5 [2–5]	5 [5–8]	4 [1–8]#	0.776
ΔМОпрон.50 град (град)	–0.5 [–6.0–1.0]	0.5 [–11.0–2.0]	0 [–7–1]	–4 [–8–0]	0.842
МОпрон.80 град (град). До	5.5 [2.0–18.0]	6.5 [2.0–8.0]	3.0 [2.0–14.0]	10.0 [6.0–18.0]	0.541
МОпрон.80 град (град). После	5 [2–9]	2 [1–5]	5 [4–9]	5 [3–7]	0.287
ΔМОпрон.80 град (град)	–4 [–9–6]	–3.5 [–6.0–2.0]	–2.0 [–9–2]	–3 [–9––1]	0.936
Средний МОпрон (град). До	7.0 [5.0–10.7]	6.2 [4.7–8.3]	3.7 [2.3–12.3]	6.7 [5.3–10.3]	0.796
Средний МОпрон (град). После	5.2 [3.3–7.0]*	5.0 [4.3–6.3]	5.3 [4.0–7.0]	4.7 [4.3–6.7]	0.976
ΔСредний МОпрон (град)	–1.7 [–6.7––0.7]	–0.8 [–1.7–1.7]	–0.3 [–4.7–2.3]	–2.3 [–6.3–1.0]	0.737

Примечание: МО — модуль ошибки углового отклонения джойстик от вертикали, суп — супинация, прон — пронация. #/*/** — $p < 0.1/0.05/0.01$ в группах по сравнению с До. ANOVA K-W — различия между всеми группами по данным однофакторного анализа *Kruskall-Wallis*. 1, 2, 3, 4 (4') — $p < 0.05 (< 0.1)$ по сравнению с 1, 2, 3, 4 группами соответственно по данным критерия *Mann-Whitney* с учетом поправки Бонферрони.

Таблица 2. Точность силовой проприоцепции при супинации по различным схемам усилия до и после тренировочного курса (Me [25%–75%])

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	ANOVA K–W, p
	Координация	Сочетанная	Силовое расслабление	Контроль	
Модуль ошибки воспроизведения нисходящего усилия (0% → 80% → 50% → 20%) при супинации					
МОсуп.80, %. До	15 [5–23] ³	24 [17–30]	30 [27–37] ¹	23 [20–35]	0.034
МОсуп.80, %. После	15 [5–20]	17 [3–33]	5 [3–12] ^{*.4}	30 [23–37]	0.044
ΔМОсуп.80, %	–1 [–10–14]	–16 [–20–7]	–27 [–30––5] ⁴	3 [1–7]	0.024
МОсуп.50, %. До	13 [10–23]	18 [15–27]	23 [20–27]	25 [18–33]	0.199
МОсуп.50, %. После	17 [7–23]	14 [3–22] [*]	3 [2–17] ^{** .4}	22 [18–27]	0.072
ΔМОсуп.50, %	–3 [–7–7] ³	–8 [–12––5]	–17 [–18––7] ^{1, .4}	–2 [–6–0]	0.008
МОсуп.20, %. До	7 [0–12]	5 [2–8]	3 [3–7]	7 [2–7]	0.963
МОсуп.20, % После	3 [0–12]	8 [3–10]	5 [2–7]	3 [0–7]	0.620
ΔМОсуп.20, %	0 [–4–0]	–1 [–2–5]	–2 [–2–4]	–1 [–5–1]	0.765
Среднее МОсуп, %. До	12.3 [8.3–16.7]	14.8 [13.3–19.7]	19.0 [17.3–23.0]	18.3 [15.0–21.7]	0.085
Среднее МОсуп, %. После	10.5 [7.7–14.3]	14.2 [5.0–20.7] [#]	6.3 [3.3–7.3] ^{** .4}	17.0 [16.0–22.0]	0.068
ΔСреднее МОсуп, %	–0.2 [–7.7–6.7] ³	–6.3 [–9.7––0.7]	–14.0 [–15.7––6.3] ^{1, .4}	1.3 [–2.3–2.0]	0.009
Модуль ошибки воспроизведения восходящего усилия (0% → 20% → 50% → 80%) при супинации					
МОсуп.20, %. До	7 [3–10]	7 [3–7]	7 [3–10]	3 [0–3]	0.342
МОсуп.20, %. После	3 [3–7]	3 [0–10]	3 [3–7]	5 [3–7]	0.887
ΔМОсуп.20, %	0 [–2–0]	–3 [–5–3]	–3 [–7–5]	2 [0–3]	0.455
МОсуп.50, %. До	7 [3–7] ⁴	17 [10–23]	20 [13–27]	22 [20–25]	0.020
МОсуп.50, %. После	9 [3–17] ⁴	11 [5–23]	8 [7–13] ^{*.4}	23 [20–25]	0.014
ΔМОсуп.50, %	3 [0–10] ³	–9 [–12–10]	–13 [–20––6] ¹	0 [–2–5]	0.035
МОсуп.80, %. До	13 [10–15] ^{2, .3, .4}	32 [20–43] ¹	33 [27–38] ¹	42 [35–43] ¹	0.003
МОсуп.80, %. После	14 [5–23]	19 [17–37] [#]	5 [2–17] ^{*.4}	40 [35–43]	0.022
ΔМОсуп.80, %	7 [–7–10]	–11 [–23–1]	–27 [–33––13] ^{1, .4}	0 [–3–5]	0.007
Средний МОсуп, %. До	6.7 [4.3–10.7] ⁴	18.8 [14.7–23.0]	18.7 [16.0–24.0]	21.7 [19.0–22.7]	0.015
Среднее МОсуп, %. После	9.5 [5.7–14.3] ⁴	12.8 [7.7–21.0]	8.3 [4.7–9.7] ^{** .4}	21.7 [18.7–25.0]	0.011
ΔСредний МОсуп, %	4.7 [–5.0–6.7] ³	–8.8 [–13.0–7.7]	–18.7 [–11.3––6.3] ¹	2.0 [–2.0–2.3]	0.016
Модуль ошибки воспроизведения одиночного усилия (0% → 20% → 0% → 50% → 0% → 80%) при супинации					
МОсуп.20, %. До	6 [3–12]	5 [3–7]	5 [3–12]	3 [2–3]	0.308
МОсуп.20, %. После	3 [0–10]	3 [3–10]	3 [0–7]	5 [3–10]	0.875
ΔМОсуп.20, %	–3 [–7–3]	0 [2–3]	1 [–12–3]	2 [–3–5]	0.582
МОсуп.50, %. До	6 [3–13]	22 [3–25]	17 [13–30]	17 [10–18]	0.315
МОсуп.50, %. После	8 [0–13]	9 [5–17]	3 [3–13] [*]	17 [10–20]	0.213

Таблица 2. Окончание

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	ANOVA K-W, p
	Координация	Сочетанная	Силовое расслабление	Контроль	
ΔМОсуп.50, %	3 [0–6]	–8 [–19–10]	–7 [–15––3]	3 [–7–10]	0.197
МОсуп.80, %. До	19 [10–20]	33 [10–40]	27 [23–43]	27 [20–37]	0.126
МОсуп.80, %. После	9 [3–20]	14 [7–30]	13 [7–13]*	32 [30–35]	0.103
ΔМОсуп.80, %	–2 [–9–7]	–3 [–25–4]	–23 [–27––20] ⁴	3 [0–6]	0.021
Средний МОсуп, %. До	10.8 [7.0–11.8]	21.3 [7.7–25.0]	17.0 [13.7–30.0]	16.3 [12.7–19.0]	0.352
Средний МОсуп, %. После	6.2 [3.3–13.3]	9.0 [6.0–16.7]	7.7 [5.0–9.7]**	17.7 [15.0–18.3]	0.172
ΔСредний МОсуп, %	–0.8 [–4.5–5.3]	–9.0 [–12.3–5.7]	–10.0 [–16.0––5.7] ⁴	0.0 [–1.3–5.0]	0.060

Примечание: см. табл. 1.

В группе "Сочетанная" обнаружена позитивная тенденция к снижению МОсуп.80 (–11%, $p < 0.1$). В группе "Дискретное расслабление" установлено снижение МОсуп.50 (–13%, $p < 0.05$), МОсуп.80 (–27%, $p < 0.01$) и среднего МОсуп (–18,7%, $p < 0.01$). Причем МОсуп.50 и МОсуп.80 после тренировки стали ниже (обе $p < 0.05$), чем в "Контроле". Тренировка дискретного расслабления была более эффективна в снижении МОсуп.50 ($p < 0.05$) и среднего МОсуп ($p < 0.05$) по сравнению с группой "Координация".

Точность дискретного сокращения в восходящем направлении с периодами расслабления. Существенное снижение МОсуп.50 (–7%, $p < 0.05$) и МОсуп.80 (–23%, $p < 0.05$) установлено только после тренировки дискретного расслабления. Однако статистически значимых различий с другими тренировочными воздействиями не выявлено.

Влияние тренировочных программ на точность воспроизведения уровня изометрического сокращения при пронации

Точность пронации нисходящего усилия. Во всех трех группах после курса тренировок выявлено существенное снижение МОпрон.80: –6% ($p < 0.05$) в группе "Координация", –8% ($p < 0.05$) в группе "Сочетанная", –13% ($p < 0.05$) в группе "Дискретное расслабление" (табл. 3). Все изменения отличались от динамики МОпрон.80 в группе "Контроль". Снижение МОпрон.50 после тренировочного курса выявлено в группах "Сочетанная" (–3%, $p < 0.1$) и "Дискретное расслабление" (–9%, $p < 0.05$). Только в группе "Координация" после тренировки выявлено существенное снижение МОпрон.20 ($p < 0.05$). Средний МОпрон снизился во всех группах (все $p < 0.05$), и эти эффекты были отличны от изменения в "Контроле".

Точность пронации восходящего усилия. МОпрон.20 не изменилась в группах за период тренировки. МОпрон.50 снизилась в группах "Сочетанная" (–10%, $p < 0.1$) и "Дискретное расслабление" (–8% $p < 0.1$). Однако снижение МОпрон.50 отличалось от группы "Контроль" только в группе "Сочетанная" ($p < 0.1$). Снижение МОпрон.80 выявлено также в группах "Сочетанная" (–20%, $p < 0.1$) и "Дискретное расслабление" (–11% $p < 0.1$), причем эти изменения были более выраженными, чем в группах "Координация" ($p < 0.05$) и "Контроль" ($p < 0.05$).

В целом, сочетанная тренировка вызвала снижение среднего МОпрон в группах "Сочетанная" (–10,7%, $p < 0.05$) и "Дискретное расслабление" (–6,7%, $p < 0.05$). Эффективность тренировки в группе "Сочетанная" была выше, чем в группах "Контроль" и "Координация".

Точность дискретного сокращения в восходящем направлении с периодами расслабления. Координационная тренировка не оказывала влияния на воспроизведение усилия путем пронации в такой схеме тестирования (табл. 3). В группе "Сочетанная" МОпрон.50 (–10%, $p < 0.05$), МОпрон.80 (–20%, $p < 0.05$) и средний МОпрон (–10,7%, $p < 0.05$) снизились после сопряженной тренировки. Эти эффекты были отличны от изменений в группах "Контроль" и "Координация". Также тренировка дискретного расслабления привела к снижению МОпрон.50 (–8%, $p < 0.05$), МОпрон.80 (–8%, $p < 0.05$) и среднего МОпрон (–5,0%, $p < 0.1$), эти эффекты были отличны от изменений в группе "Контроль".

Взаимосвязь между изменениями показателей точности воспроизведения углового отклонений джойстика и дискретного мышечного расслабления в результате тренировок в общей группе тренировавшихся испытуемых. Для оценки взаимосвязи механизмов изменения разных модальностей

Таблица 3. Точность силовой проприоцепции при пронации по различным схемам усилия до и после тренировочного курса (Me [25%–75%])

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	ANOVA K-W, p
	Координация	Сочетанная	Силовое расслабление	Контроль	
Модуль ошибки воспроизведения нисходящего усилия (0% → 80% → 50% → 20%) при пронации					
МОпрон.80, %. До	25 [17–39]	30 [10–33]	20 [13–29]	15 [7–23]	0.342
МОпрон.80, %. После	16 [13–20]*	13 [2–23]*	3 [1–8]*,4	27 [17–40]	0.003
ΔМОпрон.80, %	–6 [–22––2]4	–8 [–17––4]4	–13 [–25––8]4	11 [8–12]	0.006
МОпрон.50, %. До	22 [10–30]	23 [18–30]	21 [10–25]	19 [13–26]	0.738
МОпрон.50, %. После	13 [10–20]	13 [10–27]#	9 [5–15]*,4	25 [22–29]	0.020
ΔМОпрон.50, %	–4 [–13–3]	–3 [–18–2]4*	–9 [–10––5]4*	5 [2–7]	0.018
МОпрон.20, %. До	8 [7–10]	7 [2–10]	1 [0–6]	4 [1–11]	0.239
МОпрон.20, %. После	3 [2–8]*	3 [2–5]	2 [1–3]	3 [2–8]	0.410
ΔМОпрон.20, %	–4 [–8–1]	–3 [–5–1]	1 [–4–3]	0 [–3–2]	0.535
Средний МОпрон, %. До	19 [11–25]	18 [13–23]	14 [11–19]	11 [8–20]	0.413
Средний МОпрон, %. После	11 [10–14]*	11 [6–12]*	5 [3–9]*,4	18 [14–25]	0.002
ΔСредний МОпрон, %	–4 [–10––1]4	–5 [–12––2]4	–9 [–12––4]4	6 [3–7]	0.021
Модуль ошибки воспроизведения восходящего усилия (0% → 20% → 50% → 80%) при пронации					
МОпрон.20, %. До	5 [0–7]	7 [0–10]	3 [0–5]	4 [1–8]	0.779
МОпрон.20, %. После	1 [0–5]	7 [3–10]	6 [2–12]	1 [0–7]	0.052
ΔМОпрон.20, %	–1 [–7–0]	–2 [–3–7]	2 [–1–10]	–2 [–4–3]	0.248
МОпрон.50, %. До	13 [5–13]2	20 [17–27]1	20 [15–22]	14 [8–20]	0.008
МОпрон.50, %. После	9 [3–13]	7 [3–20]*	7 [5–17]#	17 [12–21]	0.501
ΔМОпрон.50, %	–1 [–6–10]	–10 [–17––3]4	–8 [–15–4]	0 [–5–8]	0.073
МОпрон.80, %. До	16 [10–20]2	40 [27–43]1	33 [20–43]	30 [20–34]	0.028
МОпрон.80, %. После	17 [12–33]	17 [10–33]*	7 [5–27]*	32 [15–39]	0.141
ΔМОпрон.80, %	4 [–8–10]	–20 [–27––7]1,4	–11 [–31–0]1,4	4 [–1–5]	0.007
Средний МОпрон. До	10.5 [7.7–13.3]2	21.7 [15.3–25.7]1	18.0 [12.3–21.0]	17.2 [11.5–19.0]	0.005
Средний МОпрон, %. После	9.0 [8.0–18.3]	9.7 [8.3–18.7]*	7.3 [5.3–19.0]*	17.5 [11.2–20.5]	0.237
ΔСредний МОпрон, %	–1.0 [–5.0–4.7]	–10.7 [–13.0––3.0]1,4	–6.7 [–13.0––1.0]	0.5 [–0.8–3.2]	0.013
Модуль ошибки воспроизведения одиночного усилия (0 % → 20% → 0% → 50% → 0% → 80%) при пронации					
МОпрон.20, %. До	3 [2–7]	6 [0–10]	5 [2–10]	6 [2.5–9]	0.992
МОпрон.20, %. После	3 [0–7]	8 [5–13]	7 [3–10]	6 [2–10]	0.307
ΔМОпрон.20, %	–2 [–3–0]	3 [–7–8]	2 [0–8]	–4 [–6–5]	0.538
МОпрон.50, %. До	12 [3–15]	19 [17–23]1,4	15 [12–25]	9 [5–16]	0.032
МОпрон.50, %. После	9 [3–13]	7 [3–18]*	8 [5–13]*	14 [11–18]	0.310

Таблица 3. Окончание

Показатель	Группа 1	Группа 2	Группа 3	Группа 4	ANOVA K-W, p
	Координация	Сочетанная	Силовое расслабление	Контроль	
ΔМОпрон.50, %	0 [-1 - 0]	-13 [-18 - -5] ⁴	-8 [-11 - -2] ⁴	3 [-2 - 12]	0.003
МОпрон.80, %. До	20 [13 - 27]	33 [30 - 40]	23 [20 - 43]	12 [5 - 23]	0.030
МОпрон.80, %. После	19 [10 - 33]	7 [3 - 23]**	16 [5 - 20]*	28 [20 - 30]	0.105
ΔМОпрон.80, %	0 [-5 - 2]	-23 [-27 - -7] ⁴	-8 [-15 - -3] ⁴	12 [5 - 20]	0.001
Средний МОпрон. До	10.7 [7.7 - 16.0]	18.7 [16.7 - 19.7] ⁴	17.3 [13.3 - 23.3]	8.7 [6.0 - 12.8]	0.019
Средний МОпрон, %. После	10.7 [5.7 - 17.0]	11.0 [5.3 - 14.3]*	9.3 [6.7 - 15.7] [#]	15.8 [13.5 - 17.8]	0.226
ΔСредний МОпрон, %	-2,0 [-2,3 - 0,3]	-9,7 [-12,7 - -2,3] ⁴	-5,0 [-13,7 - 1,0] ⁴	4,7 [1,3 - 11,7]	0,005

Примечание: см. табл. 1.

проприоцепции в результате примененных тренировок мы провели корреляционный анализ в общей группе тренировавшихся испытуемых ($n = 30$). Установлено (табл. 4), что изменение среднего МОсуп восходящего усилия отрицательно коррелировало с изменением среднего МОсуп углового отклонения джойстика ($r = -0.371$, $p < 0.05$). Кроме того, изменение среднего МО восходящих усилий также отрицательно коррелировало с изменением МОпрон углового отклонения джойстика ($r = -0.373$, $p < 0.05$), что, по-видимому, указывает на противоположный характер изменения пространственной и силовой проприоцепции.

Между тем, установлена только одна положительная корреляция между улучшением МОпрон дискретного сокращения с периодами расслабления с изменением МОсуп на заданные углы

отклонения джойстика ($r = 0.434$, $p < 0.05$), указывающая на однонаправленный характер изменений разных проприоцептивных модальностей. В целом, выявленные взаимосвязи указывают на выраженную специфичность тренировки разных проприоцептивных способностей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние тренировок на точность воспроизведения угловых положений кистевого джойстика (пространственную проприоцепцию). Суставное чувство формируется в корковых отделах ЦНС на основе сигналов от медленно адаптирующихся механорецепторов: первичных и вторичных афферентов мышечных веретен, связочных рецепторов Руффини и Гольджи (в случае высокоамплитудных

Таблица 4. Корреляция показателей точности воспроизведения угловых положений джойстика с изменениями точности мышечных усилий в общей группе тренируемых лиц ($n = 30$)

Изменение за период тренировки показателей проприоцептивного контроля	Пространственная проприоцепция	
	ΔСредний МО (супинация)	ΔСредний МО (пронация)
Силовая проприоцепция		
ΔСредний МОсуп (нисх)	-0.154	-0.373*
ΔСредний МОсуп (восх)	-0.371*	-0.200
ΔСредний МОсуп (дискр)	-0.218	0.025
ΔСредний МОсуп (все)	-0.229	-0.157
ΔСредний МОпрон (нисх)	-0.176	-0.209
ΔСредний МОпрон (восх)	-0.033	-0.056
ΔСредний МОпрон (дискр)	0.434*	0.268
ΔСредний МОпрон (все)	0.137	0.054

Примечание: МО — модуль ошибки, суп — супинация, прон — пронация, нисх — нисходящее усилие (0% → 80% → 50% → 20%), восх — восходящее усилие (0% → 20% → 50% → 80%), дискр — дискретное усилие с периодами расслабления (0% → 20% → 0% → 50% → 0% → 80%), все — все формы изменения усилия вместе при супинации или пронации.

движений в суставах), замыкая кольцо обратной связи при реализации двигательной программы с использованием целевых мышц [1, 2]. Для оценки пространственного проприоцептивного контроля мы использовали тест на точность воспроизведения отклонения кистевого джойстика на заданный угол от вертикали. Точность выполнения данного задания не зависит от прилагаемых усилий и, во многом, определяется контролем положений суставов верхней конечности. Согласно результатам нашего исследования, способность воспроизводить угловые положения кистевого джойстика путем пронации предплечья, а также показатели эффективности прохождения лабиринта (путь и количество ошибок) улучшились в группе "Координация" и в группе "Сочетанная". Однако эти позитивные адаптации пространственной проприоцепции не отличались от изменений в группах "Контроль" и "Дискретное расслабление".

Позитивный эффект используемой координатной тренировки на пространственный проприоцептивный контроль суставных углов предплечья, в целом, согласуется с литературными данными, в которых также показано повышение точности проприоцепции положений конечностей после различных сенсомоторных тренировок [10, 11]. В систематическом обзоре [10] авторы заключили, что проприоцептивные тренировки, направленные на улучшение восприятия положения, порога движения, силы или скорости движений, вызывают совершенствование не только проприоцептивной точности, но и различных двигательных навыков, выполняемых с участием тренируемых мышц. И наоборот, обучение новым движениям не только совершенствует изучаемый навык, но и развивает проприоцептивные способности мышц [10, 11]. В частности, показано, что обучение точным движениям руки увеличивает кинестетическую точность положения конечности, а также скорость точного движения [6].

Однако возможность переноса тренируемых проприоцептивных способностей в одних движениях на точность новых движений при участии тех же тренируемых мышц до конца не выяснена. Так, было показано улучшение пространственной точности нового указательного движения кистью у пациентов с болезнью Паркинсона на фоне роботизированных тренировок проприоцептивных способностей конечности с помощью экзоскелета [12]. По мнению авторов указанного исследования, это свидетельствовало о возможности переноса тренируемых свойств на новые движения в пределах тренируемой степени свободы сустава. Однако оценивавшаяся в работе ошибка письменного движения (почерка) не изменилась, указывая на специфичность соматосенсорного улучшения и невозможность глобального переноса тренируемых соматосенсорных способностей на движения с большим числом степеней свобо-

ды [12]. Следовательно, отсутствие различий, полученных методом *ANOVA K-W*, в эффективности использованных нами тренировочных программ в совершенствовании точности воспроизведения наклона джойстика может быть обусловлено различиями характеристик тренируемого навыка (прохождение лабиринта) и способа оценки пространственной проприоцепции – супинация и пронация джойстика.

Напротив, тренировка мышечного расслабления не влияла на точность воспроизведения наклона джойстика при пронации или супинации предплечья. Полученные нами результаты противоречат некоторым литературным данным, в которых показано, что различные силовые тренировки с сопротивлением увеличивают не только силовые способности, но и точность воспроизведения положений суставов [13]. Так, силовая тренировка плечевых мышц увеличивала как силу, так и точность воспроизведения положения предплечья в плечевом суставе у здоровых лиц, что указывает на эффективность силовых тренировок в улучшении точности проприоцепции положения сустава [13]. Также, позитивный эффект силовой тренировки, направленной на реабилитацию функциональной нестабильности голеностопного сустава, был установлен в отношении как силы мышц, так и точности воспроизведения суставного угла стопой [14]. Несмотря на противоречие с этими работами, можно полагать, что отсутствие эффекта в группе "Дискретное расслабление" в отношении точности воспроизведения суставного угла связано со специфичностью воздействия тренировки мышечного расслабления. Это подтверждается результатами другого исследования, в котором было установлено отсутствие влияния силовых тренировок постуральных мышц на увеличение точности воспроизведения наклона вертикальным телом [15]. Также, в ряде исследований продемонстрирована очень слабая корреляция между проприоцептивными и силовыми показателями одних и тех же мышц (например, мышц плеча и предплечья у гимнастов) [16].

В целом, можно заключить, что координатная тренировка вызвала небольшой позитивный эффект, и напротив, курс мышечного расслабления не изменял точность позиционирования предплечья.

Влияние тренировок на точность воспроизведения мышечных усилий (силовую проприоцепцию). В результате настоящего исследования было показано существенное улучшение способности воспроизведения по памяти заданного мышечного усилия при супинации и пронации предплечья в группе "Сочетанная" и особенно выражено — в группе "Дискретное расслабление". Повышение точности проприоцептивного контроля мышечного усилия наблюдалось во всех тестируемых

режимах: при дискретном с расслаблением, нисходящем и восходящем направлениях усилий.

Наши данные, за небольшим исключением, свидетельствующие о позитивных эффектах тренировок по мышечному расслаблению [1], в основном, противоречат работам, в которых не выявлено увеличения силовой проприоцепции в результате силовых упражнений [16, 17]. Так, в работе [16] не было установлено корреляций между воспроизведением 50% сгибающего/разгибающего усилия и силой сгибания/разгибания в локтевом суставе у элитных гимнастов, а также между силой и силовой проприоцепцией локтевого сустава у элитных китайских игроков в настольный теннис [17]. Можно полагать, что выявленное нами улучшение силовой проприоцепции в группах, использующих тренировку дискретного мышечного расслабления, вероятно, объясняется особенностями применяемой методики тренировки, а также соответствием тренировки условиям теста на силовую проприоцепцию. В частности, испытуемые обучались и далее тренировались дискретно расслаблять мышцы-пронаторы и супинаторы предплечья на заданную величину (80%–50%–20%–0%), которую они контролировали с помощью зрительной обратной связи. Следовательно, в самой методике была запрограммирована тренировка контроля проприоцептивной точности мышечного усилия.

В настоящее время в доступных источниках нет работ, анализирующих эффект целенаправленной тренировки мышечного расслабления, поэтому нет возможности сравнить наши результаты с другими исследованиями. Вместе с тем, анализ двигательных навыков у элитных спортсменов и виртуозных музыкантов указывает на значительный вклад способности к расслаблению целевых мышц в двигательные достижения [18, 19]. В частности, среди отличительных особенностей электромиографии элитных барабанщиков было не только более быстрое нарастание амплитуды миографического ответа при мышечном напряжении, но и более быстрое ее снижение в сравнении с барабанщиками среднего и начального уровней, что указывает на более развитую способность к расслаблению [18]. Помимо прочего, в работе [7] авторы, изучив точность воспроизведения мышечного усилия и расслабления, выявили более выраженную ошибку в случае расслабления сгибателей предплечья, величина которой нарастала при уменьшении мышечного напряжения.

Интересным результатом было выявление мало выраженных эффектов сочетанной тренировки, включавшей упражнения на тонкую координацию по прохождению лабиринта и дискретное расслабление, в отношении точности достижения угловых наклонов джойстика и мышечного

напряжения. Эти результаты больше указывают на специфические адаптационные эффекты разных тренировочных воздействий, в нашем случае это тренировки "координации" и "дискретного расслабления". Сочетанное применение этих тренировочных упражнений, как минимум, не усиливало эффекты, полученные при их изолированном применении. Авторы настоящей статьи не нашли в доступных источниках не данных об эффекте интерференции или суммации разных координационных тренировок в развитии сенсомоторных способностей, однако при этом эффект дивергенции молекулярных механизмов адаптации при одновременном развитии силы и выносливости хорошо известен [19]. В дальнейшем необходимы дополнительные исследования для выяснения точных тренировочных эффектов при сочетанном использовании координационных упражнений разной направленности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования, свидетельствующие о выраженном совершенствовании точности проприоцептивного контроля мышечного напряжения, подкрепленные литературными данными о вкладе способности расслаблять мышцы в сенсомоторную координацию, позволяют рекомендовать практическое использование обсуждаемых методов тренировки.

Применение упражнений, направленных на дискретное расслабление целевых мышц с обратной связью по ЭМГ позволит тренерам и специалистам по физической реабилитации улучшать у своих подопечных проприоцептивный контроль мышечного напряжения и достигать целей, связанных с совершенствованием способности сенсомоторной координации при тренировках различных мануальных навыков.

Существенное развитие способности к воспроизведению мануального усилия при использовании тренировки на контролируемое мышечное расслабление создает перспективы к новым исследованиям данного подхода.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ Научный центр неврологии (Москва).

Соблюдение этических стандартов. Все исследования проводились в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Они также были одобрены локальным этическим комитетом Научного центра неврологии (Москва), протокол № 12 от 27.12.2020 г.

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных

рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.М. Котову-Смоленскому за бесценный опыт и практические решения.

Вклад авторов в публикацию. Е.С. Иконникова — организация исследования, набор испытуемых в группы, проведение всех инструментальных измерений, первичная обработка данных, корректировка текста статьи. А.А. Мельников — коррекция организации исследования, статистическая обработка данных, написание текста статьи. Р.Х. Люкманов — идея и общая организация исследования, научно-техническое обеспечение исследования, корректировка текста статьи. А.С. Клочков — первичная обработка данных, организация исследования. Н.А. Супонева — координация исследования, корректировка текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hagert E.* Proprioception of the wrist joint: a review of current concepts and possible implications on the rehabilitation of the wrist // *J. Hand. Ther.* 2010. V. 23. № 1. P. 2.
2. *Proske U., Gandevia S.C.* The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force // *Physiol. Rev.* 2012. V. 92. № 4. P. 1651.
3. *Goble D.J.* Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice // *Phys. Ther.* 2010. V. 90. № 8. P. 1176.
4. *Horváth Á., Ferentzi E., Schwartz K. et al.* The measurement of proprioceptive accuracy: A systematic literature review // *J. Sport Health Sci.* 2023. V. 12. № 2. P. 219.
5. *Kato K., Vogt T., Kanosue K.* Brain activity underlying muscle relaxation // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 1457.
6. *Ostry D.J., Darainy M., Mattar A.A. et al.* Somatosensory plasticity and motor learning // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. № 15. P. 5384.
7. *Ohtaka C., Fujiwara M.* Control strategies for accurate force generation and relaxation // *Percept. Mot. Skills.* 2016. V. 123. № 2. P. 489.
8. *Choi J., Yeoh W.L., Loh P.Y., Muraki S.* Force and electromyography responses during isometric force release of different rates and step-down magnitudes // *Hum. Mov. Sci.* 2019. V. 67. P. 102516.
9. *Pinto B.L., McGill S.M.* Voluntary Muscle relaxation can mitigate fatigue and improve countermovement jump performance // *J. Strength. Cond. Res.* 2020. V. 34. № 6. P. 1525.
10. *Winter L., Huang Q., Sertic J.V.L., Konczak J.* The effectiveness of proprioceptive training for improving motor performance and motor dysfunction: A systematic review // *Front. Rehabil. Sci.* 2022. V. 8. № 3. P. 830166.
11. *Aman J.E., Elangovan N., Yeh I.L., Konczak J.* The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: A systematic review // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. V. 8. P. 1075.
12. *Elangovan N., Tuite P.J., Konczak J.* Somatosensory training improves proprioception and untrained motor function in Parkinson's disease // *Front. Neurol.* 2018. V. 9. P. 1053.
13. *Salles J.I., Velasques B., Cossich V.* Strength training and shoulder proprioception // *J. Athl. Train.* 2015. V. 50. № 3. P. 277.
14. *Docherty C.L., Moore J.H., Arnold B.L.* Effects of strength training on strength development and joint position sense in functionally unstable ankles // *J. Athl. Train.* 1998. V. 33. № 4. P. 310.
15. *Мельников А.А., Смирнова П.А., Федоров А.М., Малахов М.В.* Влияние силовой тренировки нижних конечностей на постральную устойчивость физически активных девушек // *Физиология человека.* 2022. Т. 48. № 6. С. 76.
16. *Niespodziński B., Kochanowicz A., Mieszkowski J. et al.* Relationship between joint position sense, force sense, and muscle strength and the impact of gymnastic training on proprioception // *Biomed. Res. Int.* 2018. V. 2018. P. 5353242.
17. *Shang X.D., Zhang E.M., Chen Z.L. et al.* Correlation analysis of national elite Chinese male table tennis players' shoulder proprioception and muscle strength // *World. J. Clin. Cases.* 2022. V. 10. № 24. P. 8514.
18. *Fujii S., Moritani T.* Rise rate and timing variability of surface electromyographic activity during rhythmic drumming movements in the world's fastest drummer // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2012. V. 22. № 1. P. 60.
19. *Murach K.A., Bagley J.R.* Skeletal muscle hypertrophy with concurrent exercise training: contrary evidence for an interference effect // *Sports Med.* 2016. V. 46. № 8. P. 1029.

REFERENCES

1. *Hagert E.* Proprioception of the wrist joint: a review of current concepts and possible implications on the rehabilitation of the wrist // *J. Hand. Ther.* 2010. V. 23. № 1. P. 2.
2. *Proske U., Gandevia S.C.* The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force // *Physiol. Rev.* 2012. V. 92. № 4. P. 1651.
3. *Goble D.J.* Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice // *Phys. Ther.* 2010. V. 90. № 8. P. 1176.
4. *Horváth Á., Ferentzi E., Schwartz K. et al.* The measurement of proprioceptive accuracy:

- A systematic literature review // *J. Sport Health Sci.* 2023. V. 12. № 2. P. 219.
5. Kato K., Vogt T., Kanosue K. Brain activity underlying muscle relaxation // *Front. Physiol.* 2019. V. 10. P. 1457.
 6. Ostry D.J., Darainy M., Mattar A.A. et al. Somatosensory plasticity and motor learning // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. № 15. P. 5384.
 7. Ohtaka C., Fujiwara M. Control strategies for accurate force generation and relaxation // *Percept. Mot. Skills.* 2016. V. 123. № 2. P. 489.
 8. Choi J., Yeoh W.L., Loh P.Y., Muraki S. Force and electromyography responses during isometric force release of different rates and step-down magnitudes // *Hum. Mov. Sci.* 2019. V. 67. P. 102516.
 9. Pinto B.L., McGill S.M. Voluntary Muscle relaxation can mitigate fatigue and improve countermovement jump performance // *J. Strength. Cond. Res.* 2020. V. 34. № 6. P. 1525.
 10. Winter L., Huang Q., Sertic J.V.L., Konczak J. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor performance and motor dysfunction: A systematic review // *Front. Rehabil. Sci.* 2022. V. 8. № 3. P. 830166.
 11. Aman J.E., Elangovan N., Yeh I.L., Konczak J. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: A systematic review // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. V. 8. P. 1075.
 12. Elangovan N., Tuite P.J., Konczak J. Somatosensory training improves proprioception and untrained motor function in Parkinson's disease // *Front. Neurol.* 2018. V. 9. P. 1053.
 13. Salles J.I., Velasques B., Cossich V. Strength training and shoulder proprioception // *J. Athl. Train.* 2015. V. 50. № 3. P. 277.
 14. Docherty C.L., Moore J.H., Arnold B.L. Effects of strength training on strength development and joint position sense in functionally unstable ankles // *J. Athl. Train.* 1998. V. 33. № 4. P. 310.
 15. Melnikov A.A., Smirnova P.A., Fedorov A.M., Malahov M.V. The influence of lower limbs strength training on the postural stability of physically active girls // *Human Physiology.* 2022. V. 48. № 6. P. 696.
 16. Niespodziński B., Kochanowicz A., Mieszkowski J. et al. Relationship between joint position sense, force sense, and muscle strength and the impact of gymnastic training on proprioception // *Biomed. Res. Int.* 2018. V. 2018. P. 5353242.
 17. Shang X.D., Zhang E.M., Chen Z.L. et al. Correlation analysis of national elite Chinese male table tennis players' shoulder proprioception and muscle strength // *World. J. Clin. Cases.* 2022. V. 10. № 24. P. 8514.
 18. Fujii S., Moritani T. Rise rate and timing variability of surface electromyographic activity during rhythmic drumming movements in the world's fastest drummer // *J. Electromyogr. Kinesiol.* 2012. V. 22. № 1. P. 60.
 19. Murach K.A., Bagley J.R. Skeletal muscle hypertrophy with concurrent exercise training: contrary evidence for an interference effect // *Sports Med.* 2016. V. 46. № 8. P. 1029.

The Effect of Arm Muscle Discrete Relaxation Training and Fine-Coordination Training on Proprioceptive Control

E. S. Ikonnikova^{a, b}, A. A. Melnikov^{b, *}, R. Kh. Lyukmanov^a, A. S. Klochkov^a,
N. A. Suponeva^a

^aResearch Center of Neurology, Moscow, Russia

^bRussian University Sport "GTSOLIFK", Moscow, Russia

*E-mail: meln1974@yandex.ru

Proprioception makes an important contribution to the regulation of speed, strength and spatial parameters of movements, determining the level of proficiency in motor skills. However, the effectiveness of various training approaches in relation to voluntary proprioceptive control of target muscles has not been sufficiently studied. In this paper, we investigated the effectiveness of three types of manipulative training: 1) fine coordination, 2) discrete muscle relaxation and 3) their combinations in relation to the accuracy of reproducing: a) the angular deviation of the joystick from the vertical and b) static muscle efforts during the pronation and supination of the joystick. The study involved 40 young (18-35 years old), physically active volunteers who randomly made up 4 groups of 10 people: "Control" (lack of training), "Coordination" (training of passing an analog of a slit maze with a thin probe), "Discrete relaxation" (training of discrete muscle relaxation of pronators and supinators of the forearm), "Combined" (combined training of maze passing and discrete relaxation). Before and after training (n = 10) we evaluated: 1) the accuracy of reproduction of the deviation of the wrist joystick from the vertical by 20, 50, 80 degrees and 2) the accuracy of reproduction of isometric contraction (0, 20, 50 and 80% of the maximum effort) in the descending, ascending directions as well as discrete achievement of any effort level by pronation /supination of the wrist joystick. It was found that coordination training increased the length of the traversed path in 3 minutes with a reduced number of errors, and increased the proprioceptive accuracy of reproducing the angle of deviation of the joystick by 20 degrees also. In the "Discrete Relaxation" group the average modulus of errors in reproducing descending, ascending and discrete forces

during supination, as well as the average modulus of errors in reproducing descending, ascending and discrete forces during forearm pronation decreased after course training. At the same time, no changes in the accuracy of reproducing the angular positions of the joystick were found in this group. In the “Combined” group, training led to an increase in the accuracy of reproducing ascending and descending efforts during pronation, as well as the accuracy of descending efforts during supination of the forearm. In addition, in this group, a decrease in the error modulus during reproducing the tilt of the joystick by 50 degrees by supination was revealed. Correlation analysis did not reveal positive links between training changes in proprioceptive control of different modality. Thus, the training effects used on the target muscles of the forearm have a specific effect on the proprioceptive control of muscle effort and spatial position in the hand joints. The high efficiency of discrete relaxation training regarding the accuracy of voluntary efforts allows us to recommend its use in order to increase the level of mastery of the motor skills of the hand.

Keywords: proprioceptive accuracy, force proprioception, joint position proprioception, manipulative coordination, discrete relaxation training.