

УДК 796.012.2:612.886

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЬНОЙ КООРДИНАЦИИ НА ОСНОВЕ ТРЕНИРОВОК С БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

© 2022 г. А. В. Илларионова¹, С. Г. Кривошеков³, А. А. Ильин⁴, Л. В. Капилевич^{1, 2, *}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

²ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

³ФГБНУ Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины, Новосибирск, Россия

⁴Томский университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

*E-mail: kapil@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.09.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

Целью данного исследования было изучить физиологические особенности формирования равновесия и координационных способностей на основе тренировок с биологической обратной связью (БОС) по различным параметрам. В исследовании приняли участие 60 девушек в возрасте 18–20 лет, не занимающиеся спортом и входящие в основную медицинскую группу (первая группа здоровья). Разница в результатах проведенного при отборе тестирования участниц трех групп была несущественной. Контрольная группа – 20 девушек – тренировались по программе, включавшей комплекс упражнений на развитие чувствительности вестибулярного анализатора и проприоцептивной чувствительности. Первая экспериментальная группа – 20 девушек – занимались на компьютерном стабилоанализаторе “Стабилан-01-2” с использованием обратной связи по параметру “положение проекции центра тяжести”. Вторая экспериментальная группа – 20 испытуемых – занималась на аппарате “HUBER” с использованием обратной связи по параметру “прилагаемые усилия”. Занятия проводились 3 раза в неделю в течение месяца, всего 12 тренировок. Перед началом курса тренировок, а также после него, девушки проходили комплексное тестирование с использованием методов электромиографии, стабилотрии, ЭЭГ и динамометрии на аппарате “HUBER”. Установлено, что тренировки с биологической обратной связью способствуют ускоренному формированию навыка сохранения равновесия, позволяя быстрее развить проприоцептивную чувствительность, дифференцировки прикладываемых усилий без участия зрительного анализатора, а также улучшить межмышечную координацию и мышечную память. Характерной особенностью биоэлектрической активности мышц голени при сохранении статического равновесия после тренинга с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести” является включение в работу мышц голени в статическом режиме (одновременное включение мышц-антагонистов с соизмеримыми показателями биоэлектрической активности). В то же время после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” наблюдается включение в работу мышц голени в динамическом режиме (с синхронизированной сменой периодов напряжения и расслабления в мышцах-антагонистах). Отмечается более выраженное влияние тренингов с БОС на частотные и мощностные характеристики ЭЭГ по сравнению с традиционными тренировками. Полученные результаты также позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций. Все изученные в работе методики – как с БОС, так и без БОС, направлены на формирование координационных способностей и равновесия, поэтому могут быть использованы в тех видах спорта, которые предъявляют повышенные требования именно к этим качествам. Целесообразно применение этих методов на разных этапах спортивного совершенствования.

Ключевые слова: биофидбек, регуляция движения, координация, равновесие, межмышечные взаимодействия, мышечно-суставное чувство.

DOI: 10.31857/S013116462204004X

Проблема поиска новых подходов к совершенствованию двигательных навыков и физических способностей спортсменов остается актуальной. В настоящее время возможности традиционных

подходов в значительной степени исчерпаны. Жесткость антидопинговых правил существенно ограничивает возможности фармакологической поддержки спортсменов. В этих условиях внима-

ние исследователей привлекает перспектива применения информационных технологий и технических устройств [1, 2]. Особой эффективностью обладают методические приемы, направленные на предоставление дополнительной информации — биологической обратной связи (БОС), или биоуправления; в англоязычной литературе используется термин *biofeedback* [3, 4].

Н.А. Бернштейн [5], описывая физиологические механизмы поддержания равновесия, впервые указал на систему обратных связей при поддержании равновесия — “сенсорную коррекцию”. В настоящее время концепция БОС находит подтверждение при исследовании механизмов постурального контроля и их нарушениях в условиях невесомости и при ряде заболеваний [6–9]. Поэтому поиск новых методических подходов для коррекции поддержания равновесия имеет большое практическое значение.

Спектр применений технологии БОС в спортивной деятельности достаточно широк — от оптимизации нагрузок и обеспечения пиковой производительности скелетной мускулатуры до обучения расслаблению и восстановлению после нагрузок [10, 11]. Обратная связь дает возможность осуществлять физическую работу, сбалансированную по силе, координации движений и постуральному контролю. Метод БОС позволяет также, используя мультимедийные возможности, обеспечивать высокую эмоциональную заинтересованность и нестандартность проведения занятий [12–14].

Тренировки с БОС проводятся по различным параметрам — частоте и структуре сердечных сокращений [15, 16], частоте ритмов электроэнцефалограммы (ЭЭГ) [17], по параметрам дыхания и т.д. Перспективным направлением также видится использование БОС в развитии координации как способности согласовывать мышечные напряжения в соответствии с намеченной двигательной программой, поскольку для управления системой движений важное значение имеет самоконтроль, осуществляемый на основе отчетливых двигательных представлений, а одним из способов его совершенствования является развитие точности восприятия и воспроизведения проявляемых собственных усилий при решении двигательных заданий различной направленности [18–20].

В последние годы публикуется большое количество работ, в которых анализируется использование различных видов тренировок с БОС. Основным направлением использования биоуправления с целью сознательной регуляции функций организма остается физическая реабилитация (в том числе после спортивных травм) [11, 21]. Однако немало исследований выполнено применительно к вопросам повышения спортивного мастерства [2, 11, 18]: доказана эффективность

срочной обратной связи в обеспечении роста спортивной результативности путем совершенствования навыка дифференцировать и оценивать основные специфические параметры движений в выбранной спортивной специализации [10, 22].

В то же время исследования, направленные на развитие физических качеств за счет сочетания различных видов БОС-тренинга, встречаются гораздо реже; сравнительная эффективность и механизмы реализации эффектов различных видов тренинга в решении данной задачи мало изучены.

Цель данной работы — исследовать физиологические особенности формирования равновесия и координационных способностей на основе тренировок с БОС по различным параметрам.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 60 девушек в возрасте 18–20 лет, не занимающиеся спортом и входящие в основную медицинскую группу (первая группа здоровья), т.е. без отклонений в состоянии здоровья и физическом развитии, имеющие хорошее функциональное состояние и соответствующую возрасту физическую подготовленность. Вывод о состоянии здоровья девушек делали исходя из данных собранного анамнеза, результатов исследования уровня здоровья и функционального состояния организма, а также медицинского осмотра, допускающего исследуемых до занятий физической культурой в основной медицинской группе. При формировании плана исследований учитывали фазы менструального цикла испытуемых. Исследования девушек проводили в постменструальную фазу цикла.

Для исследования отбирали девушек со стандартным типом телосложения — исключали студенток высокого или низкого роста, с нестандартным соотношением длины тела и ног. Критериями исключения из исследования также являлись: наличие заболеваний сердечно-сосудистой, нервно-мышечной и опорно-двигательной систем, неврологические заболевания, несовместимые с физической активностью, травмы, заболевания в остром периоде, дефицитная (индекс массы тела (ИМТ) ниже 18.5) или избыточная (ИМТ выше 25.0) масса тела, ожирение (ИМТ выше 30.0), состояние переутомления. В группу не включали участниц, имевших опыт занятий видами спорта, направленными на развитие координации.

В результате отбора были сформированы 3 группы девушек так, чтобы разница между результатами проведенного при отборе тестирования участниц трех групп была несущественной. 20 девушек (контрольная группа, или группа “Упражнения”) тренировались по программе,

включавшей комплекс упражнений на развитие чувствительности вестибулярного анализатора и проприоцептивной чувствительности. 20 девушек (первая экспериментальная группа, или группа “Стабилан”) занимались на компьютерном стабилоанализаторе “Стабилан-01-2” (ЗАО ОКБ “Ритм”, Россия) с использованием обратной связи по параметру “положение проекции центра тяжести”. Остальные 20 испытуемых (вторая экспериментальная группа, или группа “HUBER”) занимались на аппарате “HUBER” (“LPG SYSTEMS”, Франция) с использованием обратной связи по параметру “прилагаемые усилия”. Занятия проводили 3 раза в неделю в течение месяца, всего 12 тренировок.

Перед началом тренировочной программы, а также после нее с девушками в течение четырех дней с 10.00 до 12.00 проводили следующие виды исследований.

1 день – исследование на “НС Психотест” (методики “Теппинг-тест” и “Контактная координаметрия по профилю”), определение мышечной точности с помощью динамометра. Данные методики предназначены для оценки согласованности движений и координации двигательных действий испытуемых в пространстве.

При выполнении Теппинг-теста испытуемому предлагали в течение заданного интервала времени произвести как можно больше ударов “карандашом” по специальной платформе. Учитывали число ударов, среднюю частоту ударов (Гц), уровень мануальной асимметрии (с), усредненные междударные интервалы для правой и левой руки (с).

Методику “Контактная координаметрия по профилю” из каталога исследований компьютерного комплекса “НС-Психотест” применяли для диагностики точности движений руки обследуемого при решении двигательных задач, а, следовательно, и его способности к координации движений. Испытуемому предлагали вставить алюминиевый стержень через одно из отверстий специальной платформы с лабиринтом в начало лабиринта на глубину 2–3 мм и, держа руку на весу, как можно быстрее провести концом стержня до конца лабиринта, стараясь не касаться краев отверстия. Регистрировали продолжительность тестирования (с), количество касаний (общее и в секунду), общее и среднее время касаний (с).

Тест на мышечную точность использовали для оценки проприоцептивной чувствительности. Тест состоял из двух этапов. Первый этап – сжатие кистью руки пружинного динамометра на максимально возможную величину. Затем испытуемому необходимо было 3 раза повторить сжатие пружины на силу 50% от исходной с закрытыми глазами. Результат оценивали в виде отклонения от заданной силы (в кг).

2 день – стабилография и ЭЭГ. Стабилографические исследования проводили с использованием компьютерного стабилоанализатора с БОС “Стабилан-01-2” (ЗАО ОКБ “Ритм”, Россия).

Для оценки уровня кратковременной моторной памяти и проприоцептивной чувствительности использовали пробу “Треугольник”. Перед записью производили центрирование. Во время тестирования стопы от платформы отрывать запрещалось. Тест выполняли с использованием обратной связи зрительной модальности. Данная проба состоит из двух этапов. На этапе анализа обследуемый с помощью максимально возможного отклонения центра давления (ЦД) в трех направлениях (вперед, вправо-назад, влево-назад) без отрыва стоп от платформы должен был установить приемлемое для себя расположение маркеров – вершин треугольника – на экране монитора. Затем в течение 1 мин испытуемый должен был перемещать свой ЦД последовательно от одной вершины к другой по мере того, как установленные маркеры будут загораться красным цветом, описывая фигуру “треугольник”. На втором этапе обследуемый в течение двух минут должен был также описывать данную фигуру “треугольник”, но уже без помощи функции обратной связи.

После проведения исследования рассчитывали величины отклонения траектории движения ЦД испытуемого от фигуры “треугольник”, полученной на этапе обучения, в виде средних систематической и случайной ошибок во фронтальной и саггитальной плоскостях (мм).

ЭЭГ проводили с использованием программно-аппаратного комплекса “Нейрон-спектр 4/П” (ООО “Нейрософт”, Россия) в системе отведений “10-20” по 8 каналам (четные справа, нечетные слева): лобные (Fp_1 , Fp_2), область центральной борозды (C_3 , C_4), височные (T_3 , T_4), затылочные (O_1 , O_2) электроды и монтажом с объединенным ушным электродом. Запись ЭЭГ осуществляли при проведении следующих проб с закрытыми глазами:

1) фоновая запись (в состоянии относительно покоя с закрытыми глазами) – 180 с;

2) проба 1 – простая проба Ромберга с закрытыми глазами (испытуемый стоит без обуви с закрытыми глазами, плотно сдвинув стопы, руки вытянув вперед, пальцы расслаблены и несколько разведены) – 10 с;

3) проба 2 – усложненная проба Ромберга с закрытыми глазами (ноги испытуемого стоят на одной линии (носок левой ноги упирается в пятку правой). Руки вытянуты вперед, пальцы расслаблены и несколько разведены) – 10 с;

4) проба 3 – проба Бирюк с закрытыми глазами (испытуемый встает в сомкнутую стойку на

носках, руки вверх и удерживает данное положение) – 10 с.

Анализ ЭЭГ включал оценку таких параметров, как амплитуда спектра и мощность спектра α - и β -ритмов. Под симметричностью ЭЭГ понимали значительное совпадение амплитуд гомотопных отделов обоих полушарий мозга – различие менее 50%.

3 день – электромиография (ЭМГ) на компьютерном комплексе “Нейро-МВП-4”. Отведение и регистрацию биопотенциалов скелетных мышц осуществляли по общепринятой методике с помощью многофункционального компьютерного комплекса “Нейро-МВП-4” (Россия). Выполняли исследование биоэлектрической активности передних большеберцовых (*musculus tibialis anterior*) и икроножных мышц (*m. gastrocnemius*) обеих ног. Регистрацию биоэлектрической активности мышц осуществляли при выполнении следующих проб:

– простая проба Ромберга – испытуемый стоит без обуви, плотно сдвинув стопы, руки вытянув вперед, пальцы расслаблены и несколько разведены, сначала с открытыми (10 с), затем с закрытыми (10 с) глазами;

– усложненная проба Ромберга – ноги испытуемого стоят на одной линии (носок левой ноги упирается в пятку правой). Руки вытянуты вперед, пальцы расслаблены и несколько разведены. Испытуемый выполняет пробу сначала с открытыми (10 с), затем с закрытыми (10 с) глазами;

– проба Бирюк – испытуемый встает в сомкнутую стойку на носках, руки вверх и удерживает ее сперва с открытыми (10 с), затем с закрытыми (10 с) глазами.

4 день – динамометрия на аппарате “HUBER”. Для тестирования проприоцептивной чувствительности девушек в условиях дополнительной вестибулярной нагрузки использовали многофункциональный аппарат “HUBER”. Особенность аппарата заключается в мультисенсорном воздействии на проприорецепцию, экстероцепцию и органы чувств пациента во время изотонически-изометрического усилия в различных вариантах выполнения двигательного задания: меняется скорость и амплитуда движения опорной платформы.

Аппарат представляет собой моторизованную подвижную платформу, соединенную с вертикальной динамической колонной, в которую встроены: многосекторные рукояти, содержащие сенсоры для измерения прикладываемого усилия; интерактивный дисплей для осуществления обратной связи с тренируемым и саморегулирования двигательной активности относительно различных групп мышц, участвующих в выполняемом движении непосредственно во время его осуществления; координационное табло для отображения информации о степени синхронизации (коорди-

нации) двигательной активности мышц правой и левой сторон тела тренируемого при выполнении движения.

Затем в течение 4 нед., 3 раза в неделю с девушками проводили тренировки в зависимости от группы по одной из трех программ. Выполнение упражнений в каждой программе было регламентировано. Объем, дозировку, продолжительность, интенсивность выбирали с учетом реакции организма на нагрузку и уровня функциональной и технической подготовленности. Интенсивность занятий возрастала от занятия к занятию до середины курса, к концу курса снижалась.

Группа “Упражнения” тренировалась по программе, включавшей комплекс упражнений на развитие чувствительности вестибулярного анализатора и проприоцептивной чувствительности без обратной связи. Длительность занятия – 1 ч.

Группа “Стабилан” занималась по программе развития чувствительности вестибулярного анализатора на стабиланализаторе “Стабилан-01-2” посредством корректировки траектории перемещения ЦД на плоскости опоры. Продолжительность занятия составляла 30 мин и состояла из включенных в программное обеспечение аппарата стабиланализатора компьютерных игр различной степени сложности, проводимых с помощью метода БОС. Управляющим параметром БОС-тренинга служило положение ЦД на плоскости опоры, условно принимаемое в качестве проекции общего центра тяжести тела. Критерием оценки эффективности тренинга служила доля времени от общей продолжительности тренинга, в которое испытуемый удерживал ЦД в заданных пределах. Тренинг оценивали как успешный, если указанная величина составляла 80% и более.

Группа “HUBER” занималась по программе развития двигательного анализатора (ДА) на аппарате “HUBER” посредством корректировки усилия, прикладываемого к силоизмерительным элементам аппарата. Продолжительность занятия составляла 1 ч. Управляющим параметром БОС-тренинга служила величина прилагаемого усилия (жим или тяга). Критерием оценки эффективности тренинга служила средняя разница между эталонным и прилагаемым усилием за период выполнения тренинга. Тренинг оценивали как успешный, если указанная величина составляла 80% и более от величины эталонного усилия.

Испытуемых экспериментальных групп, которые к пятой тренировке не могли обеспечить указанный выше уровень успешности тренинга, исключали из исследования.

Статистическую обработку материала проводили с использованием прикладного программного пакета *Statistica 8.0 for Windows (Statsoft, США)*. Описательный анализ включал определе-

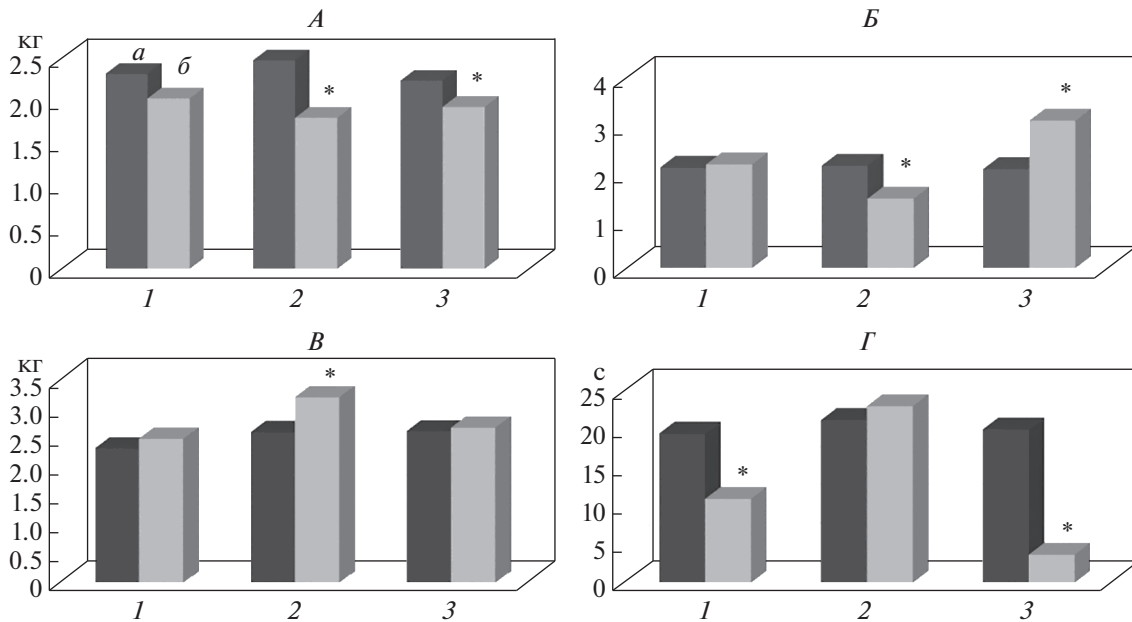


Рис. 1. Результаты психофизиологического тестирования спортсменов после различных видов тренировок. *А* – динамометрия: средняя ошибка для левой руки, кг. *Б* – контактная координациометрия по профилю: количество касаний в секунду. *В* – динамометрия: средняя ошибка для правой руки, кг. *Г* – Теппинг-тест: показатель мануальной асимметрии, с. 1 – группа “Упражнения”, 2 – группа “Стабилан”, 3 – группа “HUBER”. *а* – до курса тренировок, *б* – после. * – достоверность различий с результатами до курса тренировок ($p < 0.05$).

ние среднего арифметического значения, ошибки среднего значения “среднее \pm ошибка среднего” ($X \pm m$). Для проверки характера распределения признака полученных данных использовали критерий Колмогорова–Смирнова. Поскольку данные не подчинялись параметрическому закону распределения, анализ выполняли с помощью критерия *Kruskal-Wallis ANOVA test*. Данные представлены в виде $X_{ср} \pm SE$. Статистически значимыми считали различия данных при $p < 0.05$. Для оценки взаимосвязи между величинами биоэлектрической активности различных групп мышц использовали коэффициент ранговой корреляции Спирмена (ρ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты свидетельствуют о наличии существенных особенностей в реализации эффектов различных типов тренировок, направленных на формирование у спортсменов координационных способностей и равновесия.

По результатам Теппинг-теста после курса занятий наблюдалось достоверное уменьшение показателя мануальной асимметрии (т.е. разницы в междуручных интервалах правой и левой руки) в первой и третьей группах, занятия в которых включали, в том числе, работу верхними конечностями (на силовую выносливость, проприоцептивную чувствительность) (рис. 1, Г).

При тестировании по методике “Контактная координациометрия по профилю” в группе “Стабилан” после курса тренировок наблюдалось снижение таких показателей, как количество касаний. Среднее время касания при этом достоверно снизилось. Таким образом, у обследуемых группы “Стабилан” после курса тренировок можно констатировать увеличение скорости исправления возникающих ошибок, что может говорить об улучшении нервной регуляции движений (рис. 1, Б).

При тестировании по методике “Динамометрия” после курса тренировок наблюдается достоверное сокращение величины средней ошибки, полученной при проведении тестирования левой рукой при закрытых глазах, в группах “Стабилан” и “HUBER” (рис. 1, А). Это может говорить об улучшении различимости прикладываемых усилий без участия зрительного анализатора и более корректном их дозировании после занятий в группах “Стабилан” и “HUBER”, занимавшихся на аппаратах с БОС. Аналогичный показатель для группы “Упражнения” также сократился, но незначительно. Тренировки без использования биоуправления оказались в этом аспекте самыми малоэффективными.

На рис. 2 представлены результаты стабильного графического анализа выполнения пробы “Треугольник”. Во всех группах наблюдается достоверное снижение показателей смещения общего

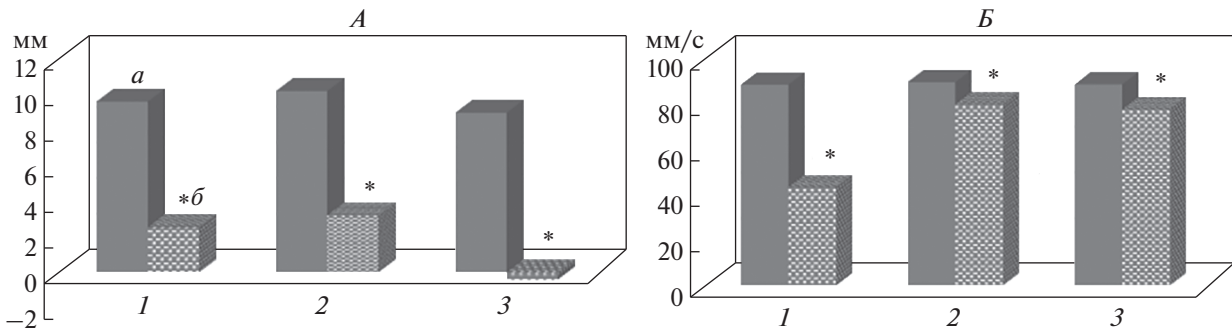


Рис. 2. Стабилографические показатели выполнения пробы “Треугольник” до и после курса тренировок. *А* – смещение общего центра тяжести (ОЦТ) во фронтальной плоскости. *Б* – средняя скорость перемещения ОЦТ. 1 – группа “Упражнения”, 2 – группа “Стабилан”, 3 – группа “HUBER”. Темные столбики – до курса тренировок, заштрихованные столбики – после курса тренировок. * – достоверность различий с результатом до курса тренировок, $p < 0.05$.

центра тяжести (ОЦТ) во фронтальной плоскости и средней скорости перемещения ЦД, величины средней случайной ошибки во фронтальной и сагитальной плоскостях на этапе анализа в сравнении с этапом обучения. После тренировок в группе “Упражнения” наблюдался достоверный рост средней систематической ошибки во фронтальной плоскости на этапе анализа в сравнении с этапом обучения. У испытуемых групп “Стабилан” и “HUBER” наблюдалось достоверное снижение данной величины на этапах обучения и анализа в сравнении с результатами до курса тренировок.

Для тестирования проприоцептивной чувствительности девушек в условиях дополнительной вестибулярной нагрузки был использован многофункциональный аппарат “HUBER”.

Наиболее сбалансированные усилия по воспроизведению эталонного усилия и одинаковой работе обеих рук в упражнениях “Жим” и “Тяга” из позиции “руки параллельно, ноги параллельно” были показаны группой “HUBER”, что указывает на развитие в процессе тренировок на тренажере “HUBER” проприоцептивной чувствительности.

Наименее сбалансированными по степени соответствия эталонному усилию и равномерной работе обеих рук, особенно в упражнении “Жим”, оказались результаты, показанные группой “Стабилан”, у которой, несмотря на более развитое чувство динамического равновесия (судя по результатам тестирования на стабиллоплатформе), мышечная чувствительность и выносливость, особенно верхних конечностей, в ходе тренинга не получила соответствующего уровня развития (рис. 3). В группе “Упражнения”, несмотря на существенные различия при тестировании после тренировок между эталонными и воспроизведенными результатами, в сравнении с результатами до курса тренировок наблюдался рост среднего

времени воспроизведения эталонного результата – показателя, на основе которого и оценивается уровень скоординированности работы испытуемого.

Различные виды тренинга также способствуют формированию различных мышечных стереотипов, реализуемых при выполнении проб на равновесие и координацию (рис. 4, табл. 1). При тренировках без применения технологий биоуправления стереотипы мышечной активности практически не изменялись.

До курса тренировок при выполнении пробы Ромберга с открытыми глазами примерно в 80% случаев поза поддерживалась за счет активного напряжения икроножных мышц, примерно в половине случаев при этом правая и левая икроножные мышцы были задействованы не в равной степени (коэффициент ранговой корреляции Спирмена $\rho = 0.87$; $p < 0.05$). В оставшихся 20% случаев основная биоэлектрическая активность наблюдалась в мышцах правой ноги ($\rho = 0.15$; $p > 0.05$), что может свидетельствовать о неравномерном распределении веса между ногами. Большая задействованность икроножных мышц в работе может говорить о том, что идет удержание тела от опрокидывания кпереди, а вес перенесен больше на переднюю часть стопы.

При выполнении данной пробы с закрытыми глазами биоэлектрическая активность рассматриваемых мышц примерно в 60% случаев была выше, чем при открытых глазах, равномерное распределение веса между стопами обеих ног наблюдалось примерно в 60% случаев ($\rho = 0.82$; $p < 0.05$), примерно в 20% случаев наблюдалась наибольшая задействованность икроножных мышц ($\rho = 0.21$; $p > 0.05$), а в 20% – попеременное перенесение веса с ноги на ногу, что выражалось в соответствующих всплесках активности на ЭМГ. Таким образом, наблюдалось неравномерное распределение нагрузки между напряженными

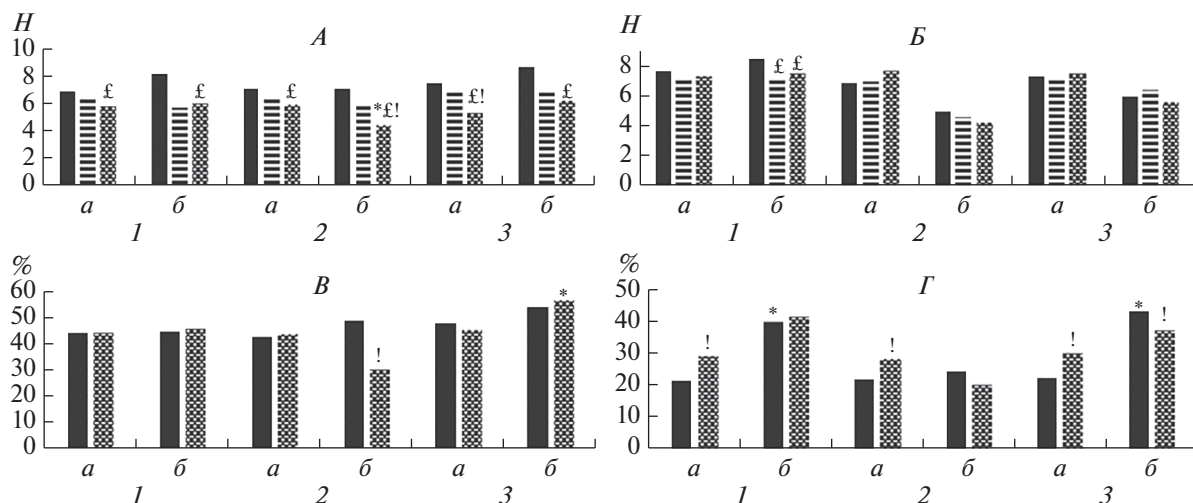


Рис. 3. Результаты выполнения девушками упражнения из положения “руки параллельно, ноги параллельно” на тренажере “HUBER” до и после тренингов. *A* – усилия, показанные при выполнении жима. *Б* – усилия, показанные при выполнении тяги. Темные столбики – эталонный результат, горизонтальная штриховка – воспроизведенный результат (левая рука), сетчатая штриховка – воспроизведенный результат (правая рука). *В* – средняя эталонная длительность воспроизведения эталонного усилия во время жима. *Г* – средняя эталонная длительность воспроизведения эталонного усилия во время тяги. Темные столбики – левая рука, заштрихованные столбики – правая рука. *1* – группа “Упражнения”, *2* – группа “Стабилан”, *3* – группа “HUBER”. *a* – до курса тренировок, *б* – после курса тренировок. * – достоверность различий с результатом до курса тренировок, $p < 0.05$. £ – достоверность различий в группе между эталонным показателем и воспроизведенным результатом, $p < 0.05$. ! – достоверность различий в группе между показателями правой и левой руки, $p < 0.05$.

мышцами, а также несогласованное включение мышц в работу. После курса тренировок во всех трех группах при выполнении пробы Ромберга наблюдается увеличение степени согласованности в работе рассматриваемых мышц, причем наиболее выраженная – в группах “HUBER” ($\rho = 0.87$; $p < 0.05$) и “Стабилан” ($\rho = 0.83$; $p < 0.05$) за счет специфики видов тренинга.

Отличительной особенностью результатов группы “Упражнения” после курса тренингов стала преимущественность паттерна селективной, не синхронизированной с рассматриваемыми мышцами активности отдельных двигательных единиц. Группа “Стабилан” характеризовалась большей долей паттерна поддержания позы на всей протяженности пробы, а также более координированной работой мышц, участвующих в поддержании рассматриваемой позы, что выражалось в одновременном появлении или исчезновении паттерна поддержания статического усилия при выполнении задания ($\rho = 0.79$; $p < 0.05$). В группе “HUBER” прослеживалась согласованность в работе рассматриваемых мышц в формате реципрокного взаимодействия мышц-антагонистов ($\rho = 0.76$; $p < 0.05$), доля паттерна поддержания позы во время пробы была меньше, чем в группе “Стабилан”, и помимо паттернов поддержания статического усилия встречались паттерны селективной активности отдельных двигательных единиц, что можно рассматривать как один из меха-

низмов коррекции движения на основе обратной связи [22].

При выполнении усложненной пробы Ромберга с закрытыми глазами после занятий во всех рассматриваемых группах отмечалось снижение амплитуды и частоты импульсов. В группах “Стабилан” и “HUBER” паттерн удержания статического напряжения был более равномерный и без существенных всплесков амплитуды и частоты, а напряжение и расслабление мышц было более согласованным ($\rho = 0.84$ и $\rho = 0.81$ соответственно; $p < 0.05$), чем в группе “Упражнения” ($\rho = 0.72$; $p < 0.05$). При этом, если в группе “Стабилан” наблюдалось одновременное включение в работу всех рассматриваемых мышц, что характерно для работы статического характера, то в группе “HUBER” наблюдалось реципрокное включение в работу мышц-антагонистов, что может указывать на способ решения задачи по сохранению статического равновесия посредством более динамичного перемещения веса тела над опорой, чем в группе “Стабилан”.

При выполнении пробы Бирюк с закрытыми глазами после курса тренировок было зафиксировано снижение амплитудных и частотных параметров во всех рассматриваемых группах, особенно в группах “Стабилан” и “HUBER”. В них колебания биоэлектрической активности были более “сглаженными” и имели более выраженные периоды нарастания и спада напряжения, что гово-

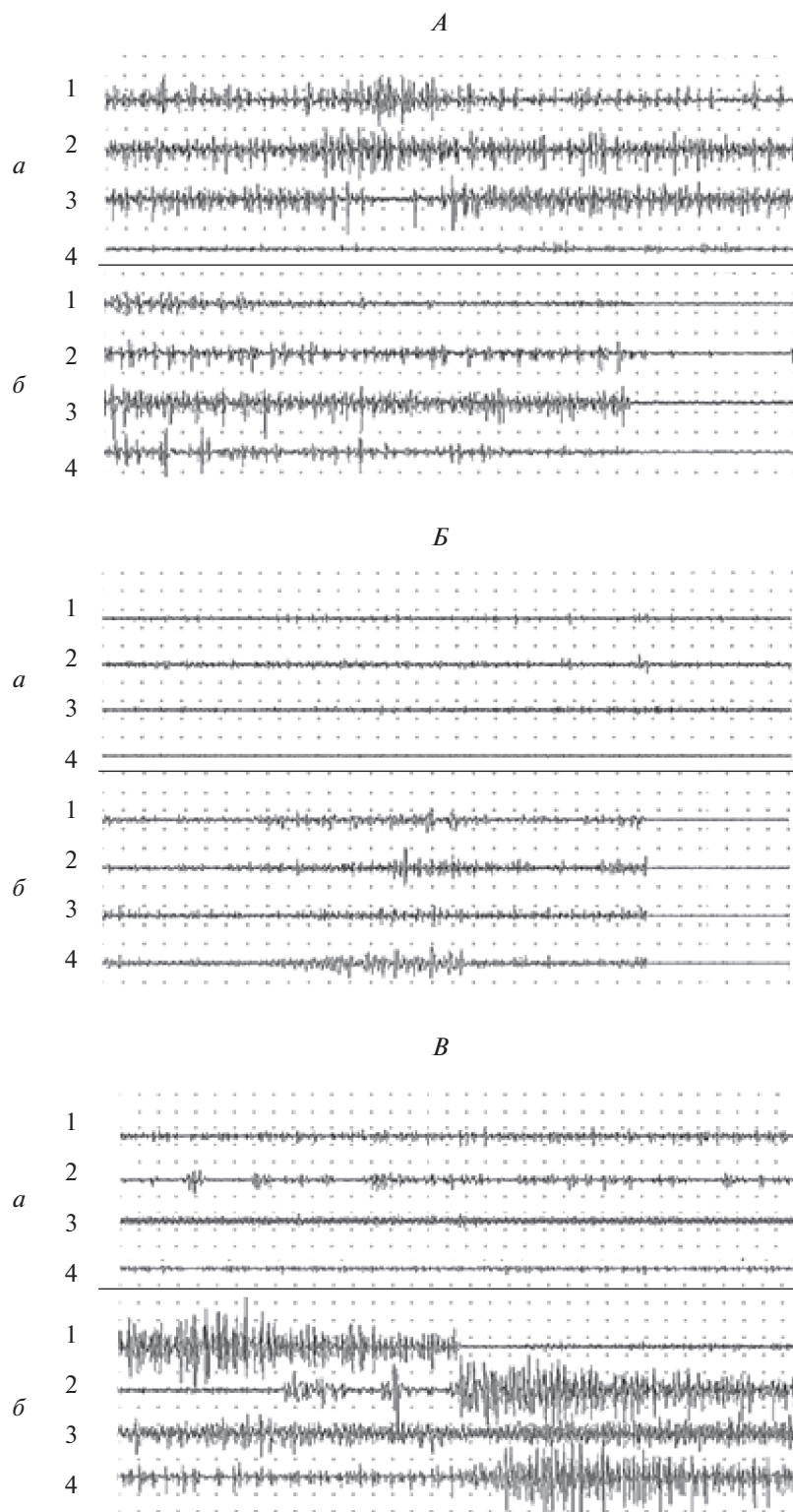


Рис. 4. Поверхностная электромиография (ЭМГ) при выполнении пробы Бирюк. *A* – группа “Упражнения”, *B* – группа “Стабилан”, *B* – группа “HUBER”. *a* – до тренировок; *б* – после тренировок. 1 – левая передняя большеберцовая мышца, 2 – левая икроножная мышца, 3 – правая икроножная мышца, 4 – правая передняя большеберцовая мышца. Отметка времени – 0.25 с, отметка амплитуды – 50 мкВ.

Таблица 1. Характеристики средней амплитуды биоэлектрической активности мышц, мкВ при выполнении проб на равновесие, $M \pm m$

Проба	Мышцы	Группа "Упражнения"			Группа "Стабилян"			Группа "HUBER"		
		до курса тренировок	после курса тренировок	до курса тренировок	после курса тренировок	до курса тренировок	после курса тренировок	до курса тренировок	после курса тренировок	
Простая проба Ромберга с открытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	142.4 ± 28.1	179.8 ± 80.9	136.2 ± 22.9	33.4 ± 5.6*, £	137.3 ± 35.6	38.0 ± 4.8*, £			
	Левая икроножная	239.2 ± 20.3	291.2 ± 12.5	242.7 ± 22.2	53.0 ± 11.8*, £	233.7 ± 39.0	95.4 ± 12.9*, £, #			
	Правая икроножная	640.4 ± 41.0	550.4 ± 55.2	598.3 ± 22.0	120.1 ± 18.7*, £	556.9 ± 34.4	140.2 ± 15.2*, £			
	Правая передняя большеберцовая	207.6 ± 19.2	280.2 ± 19.9*	212.5 ± 18.4	42.1 ± 12.4*, £	198.1 ± 7.5	32.5 ± 5.2*, £			
Простая проба Ромберга с закрытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	430.4 ± 43.3	450.6 ± 49.4	427.7 ± 24.6	156.8 ± 25.7*, £	404.9 ± 55.6	207.0 ± 32.9*, £			
	Левая икроножная	403.8 ± 38.8	413.4 ± 46.4	413.1 ± 24.0	183.8 ± 18.3*, £	397.37 ± 10.5	38.0 ± 9.8*, £, #			
	Правая икроножная	741.4 ± 37.4	793.0 ± 29.9	720.7 ± 73.0	85.2 ± 9.5*, £	684.9 ± 33.0	201.2 ± 19.8*, £, #			
	Правая передняя большеберцовая	134.7 ± 12.46	138.2 ± 11.7	131.6 ± 18.4	140.8 ± 25.6	127.9 ± 18.5	51.2 ± 9.5*, £, #			
Усложненная проба Ромберга с открытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	453.2 ± 35.3	462.0 ± 56.1	448.5 ± 73.67	150.6 ± 36.1*, £	425.8 ± 22.7	190.2 ± 22.9*, £			
	Левая икроножная	217.4 ± 56.5	160.7 ± 46.9	210.7 ± 38.3	127.6 ± 27.0*	199.4 ± 40.7	117.2 ± 29.6*			
	Правая икроножная	555.6 ± 44.7	527.0 ± 79.7	468.3 ± 23.4	29.2 ± 19.4*, £	443.5 ± 198.3	129.7 ± 17.4*, £			
	Правая передняя большеберцовая	190.2 ± 13.7	196.4 ± 60.2	186.9 ± 18.4	161.0 ± 17.4	184.3 ± 20.6	82.2 ± 11.4*, £, #			
Усложненная проба Ромберга с закрытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	663.6 ± 36.3	695.4 ± 40.89	642.5 ± 32.6	251.0 ± 21.7*, £	582.4 ± 259.6	273.2 ± 19.9*, £			
	Левая икроножная	398.2 ± 34.7	374.3 ± 83.6	349.1 ± 47.5	240.8 ± 18.5*, £	357.4 ± 29.3	148.7 ± 33.2*, £, #			
	Правая икроножная	645.2 ± 25.7	553.0 ± 68.8	617.4 ± 82.6	170.0 ± 12.7*, £	632.2 ± 22.5	232.7 ± 48.7*, £			
	Правая передняя большеберцовая	315.0 ± 45.3	322.2 ± 33.8	310.5 ± 37.6	220.4 ± 15.5*, £	321.6 ± 24.0	172.5 ± 29.6*, £			
Проба Бирюк с открытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	188.6 ± 61.2	166.6 ± 16.9	195.2 ± 63.1	399.8 ± 17.1*, £	191.7 ± 18.0	177.5 ± 14.8#			
	Левая икроножная	308.5 ± 33.7	293.8 ± 26.0*	321.4 ± 29.6	251.0 ± 32.5*	301.8 ± 31.4	141.5 ± 30.9*, £, #			
	Правая икроножная	374.0 ± 19.6	307.0 ± 38.9*	387.3 ± 28.4	178.6 ± 23.1*, £	357.4 ± 47.3	253.1 ± 49.3*			
	Правая передняя большеберцовая	311.7 ± 82.3	314.6 ± 12.4	309.4 ± 76.7	333.0 ± 50.7	337.1 ± 88.6	252.7 ± 68.5			
Проба Бирюк с закрытыми глазами	Левая передняя большеберцовая	301.0 ± 32.2	295.4 ± 7.7	313.1 ± 31.9	223.0 ± 24.2*, £	296.1 ± 37.1	226.7 ± 28.5£			
	Левая икроножная	351.0 ± 23.4	292.6 ± 25.8	366.3 ± 38.4	239.7 ± 27.2*	323.9 ± 64.1	157.5 ± 36.5*, £, #			
	Правая икроножная	375.5 ± 34.7	352.80 ± 43.7	389.4 ± 43.9	179.0 ± 13.6*, £	367.9 ± 44.3	296.5 ± 71.7#			
	Правая передняя большеберцовая	403.7 ± 54.3	379.2 ± 29.4	397.4 ± 57.4	367.5 ± 75.8	384.9 ± 64.8	307.0 ± 80.8			

Примечание: * — достоверность различий с результатами до курса тренировок, $p < 0.05$, £ — достоверность различий с группой "Упражнения", $p < 0.05$, # — достоверность различий между показателями группы "Стабилян" и группы "HUBER", $p < 0.05$.

рит о слаженном включении в работу двигательных единиц. Кроме того, во всех рассматриваемых группах (особенно в группах “Стабилан” и “HUBER”) четко выражены периоды синхронизированной импульсной активности мышц.

В группе “Упражнения” при выполнении пробы Бирюк с закрытыми глазами после курса тренировок фиксировались периоды согласованной работы мышц голени ($p = 0.65$; $p < 0.05$), но они были выражены менее четко, чем в других группах, а также включали в себя как периоды сохранения равновесия посредством одновременного напряжения всех рассматриваемых мышц, так и периоды сохранения равновесия в режиме реципрокной работы. В группе “Стабилан” наблюдалось либо одновременное напряжение всех рассматриваемых мышц ($p = 0.75$; $p < 0.05$), либо перенос веса с незначительным возрастанием амплитуды с одной ноги на другую с одновременным напряжением мышц данной ноги. В группе “HUBER” помимо равномерного распределения напряжения между рассматриваемыми мышцами ($p = 0.80$; $p < 0.05$) и одновременного напряжения мышц одной ноги, также наблюдалось одновременное включение в работу обеих передних большеберцовых или икроножных мышц, а также передней большеберцовой и икроножной мышц разноименных ног. В отличие от группы “Упражнения” скоординированность в работе мышц в группе “HUBER” была выражена четче ($p = 0.89$; $p < 0.05$), без лишней импульсной активности отдельных двигательных единиц при выполнении пробы.

В группе исследуемых, тренировавшихся без применения БОС, в большинстве случаев отсутствовала выраженная локализация средней мощности спектра α - и β -диапазонов ЭЭГ в той или иной области коры во время выполнения тестов; все области коры были задействованы приблизительно одинаково; изменения амплитуды спектра ЭЭГ от теста к тесту, а также изменения мощности спектра ЭЭГ были наименее выражены.

Наряду со сходными эффектами после тренировок с БОС (усиление α -активности преимущественно в затылочной области коры и активация высокочастотной β -активности ЭЭГ в затылочных отведениях) регистрируются и различия. Если после тренировок с использованием в качестве канала БОС параметра “положение проекции центра тяжести” наблюдались: снижение (десинхронизация) активности α - и β -диапазонов ЭЭГ в сравнении с результатами до курса тренировок, последовательный рост активности ритмов α - и β -диапазонов ЭЭГ при постепенном усложнении задания, редкие смены пространственной локализации ритмов от пробы к пробе, то тренировка с использованием в качестве канала БОС параметра “прилагаемые усилия”, напро-

тив, способствовала росту средней мощности α -активности ЭЭГ в центральной области коры, росту активности ЭЭГ-ритмов в различных областях головного мозга, значительной межполушарной асимметрией ЭЭГ-ритмов и частой пространственной сменой локализованных паттернов ЭЭГ на конвексительной поверхности от пробы к пробе (рис. 5, 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тренинги с использованием БОС по параметрам “положение проекции центра тяжести” и “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” позволяют за относительно короткое время (1 мес.) заметнее, чем при тренировках без БОС, развить проприоцептивную чувствительность, различимость прикладываемых усилий, снизить значимость зрительного анализатора (в группе, тренировавшейся с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия”), а также улучшить межмышечную координацию и мышечную память.

После тренировок с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести” развитие чувства равновесия происходит за счет улучшения нервно-мышечного контроля за положением ЦД при выполнении динамических проб, что отражается на росте степени устойчивости (умении сохранять равновесие на большей площади относительно опоры) [23, 24]. Это, помимо согласованности работы мышц, выражается в росте степени концентрации и в способности длительно удерживать данную концентрацию по время сохранения равновесия [22], что находит отражение в параметрах биоэлектрической активности в коре головного мозга [2].

Характерной особенностью формирования чувства равновесия и координации после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” является развитие умения сохранять статическую устойчивость во время отвлечения на выполнение параллельных мыслительных операций, координировать работу мышц всего тела, а также корректно дозировать прикладываемые усилия. Сходные результаты были получены авторами при использовании системы “HUBER” в практике физической реабилитации [25] и в оценке психофизиологического статуса [26]. В доступной литературе мы не нашли работ, содержащих анализ результатов использования тренажера “HUBER” в совершенствовании навыков у спортсменов. Однако имеющийся опыт обучения дифференцировке прилагаемых усилий с использованием специальных упражнений [27] говорит о перспективности и высокой эффективности такого подхода.

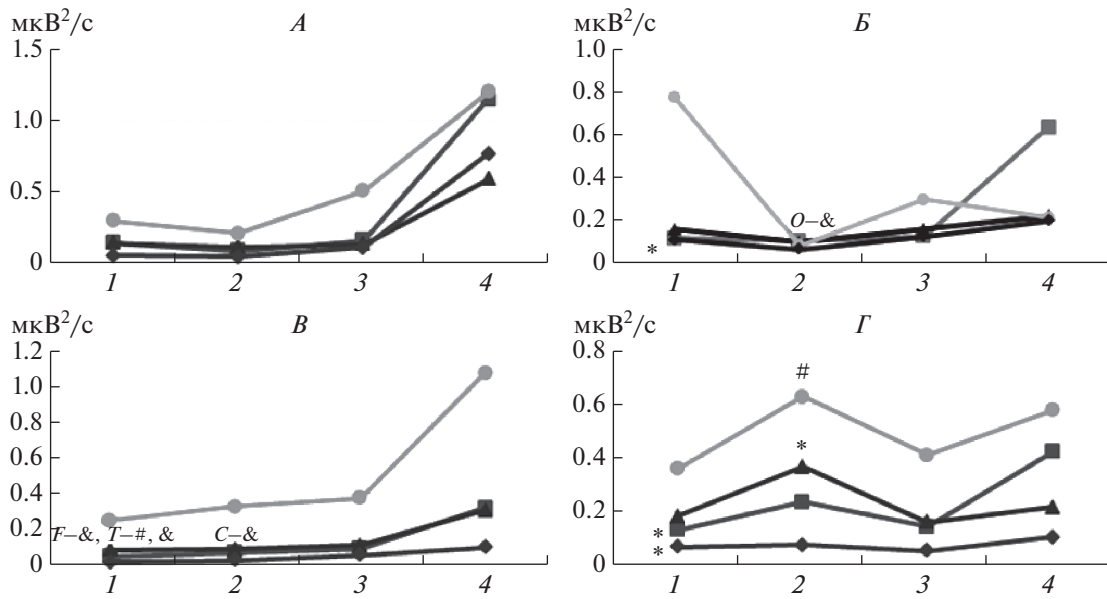


Рис. 5. Средняя мощность спектра α -активности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) до и после курса тренировок, $\text{мкВ}^2/\text{с}$. 1 – показатели фоновой записи, 2 – показатели во время выполнения простой пробы Ромберга, 3 – показатели во время выполнения усложненной пробы Ромберга, 4 – показатели во время выполнения пробы Бирюк. Отведения: квадратики – F, треугольники – C, кружки – O, ромбики – T. А – до курса тренировок, Б – после курса упражнений, В – после курса тренировок с биологической обратной связью (БОС) на аппарате “Стабилан”, Г – после курса тренингов с БОС на аппарате “HUBER”. # – статистически значимые различия между показателями при сравнении с группой “Упражнения” ($p < 0.05$), * – статистически значимые различия между показателями при сравнении с группой 2, ($p < 0.05$), & – статистически значимые различия между показателями при сравнении с группой 3 ($p < 0.05$).

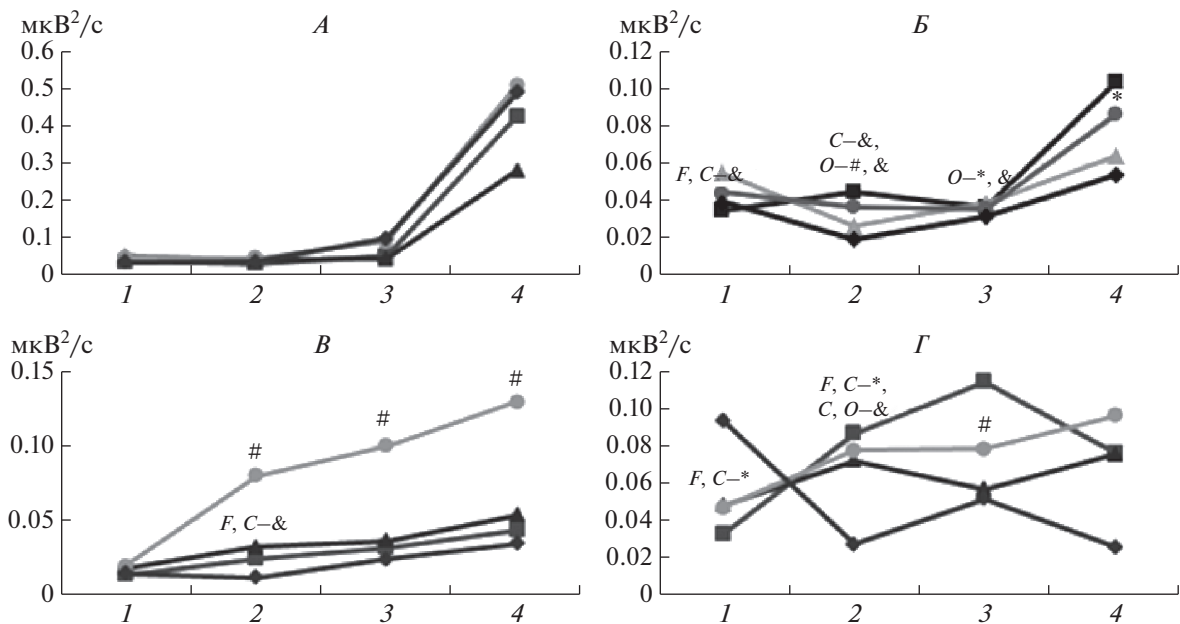


Рис. 6. Средняя мощность спектра низкочастотной β -активности электроэнцефалограммы (ЭЭГ) до и после курса тренировок, $\text{мкВ}^2/\text{с}$. Обозначения см. рис. 5.

Можно считать, что механизм сохранения равновесия после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” характеризуется постоянным изменением очагов концентрации биоэлектрической активности в коре головного мозга и частым перемещением веса тела над опорой в процессе удержания статического равновесия без зрительного контроля, что отмечается при фиксации биоэлектрической активности мышц. Можно говорить о более динамичном процессе поиска устойчивого равновесия в сравнении с тренингами с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести”.

Объяснение полученных данных, свидетельствующих о наибольшей эффективности биоуправления по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия”, можно произвести с позиции теории функциональных систем П.К. Анохина [28]. Одним из ключевых элементов этой теории является необходимость обратной связи и текущих корректирующих воздействий для обеспечения оптимального характера двигательного действия. Из трех используемых в нашей работе способов тренировки именно данный вид тренинга вовлекает в работу наибольшее количество анализаторов, предоставляя в процессе выполнения движения значительный объем срочной информации, что, в свою очередь, предоставляет оптимальную возможность для обучения коррекции двигательных действий.

Различные виды тренинга также способствуют формированию различных мышечных стереотипов, реализуемых при выполнении проб на равновесие и координацию. При тренировках без применения технологий биоуправления стереотипы мышечной активности практически не изменялись. Эти результаты соотносятся с данными литературы, свидетельствующими, что перестройка мышечных стереотипов – длительный процесс, требующий целенаправленного подхода [29]. В то же время формирование новых паттернов мышечной активности является одним из механизмов повышения мастерства спортсмена [30, 31].

Характерной особенностью биоэлектрической активности мышц голени при сохранении статического равновесия без зрительного контроля после тренинга с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести” является их включение в работу в статическом режиме (одновременное включение мышц-антагонистов с соизмеримыми показателями биоэлектрической активности), что может говорить о сохранении равновесия при минимальном колебании ЦД относительно опоры.

В то же время особенностью биоэлектрической активности мышц голени при сохранении статического равновесия без зрительного контроля после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” является их включение в работу в динамическом режиме (с синхронизированной сменой периодов напряжения и расслабления в мышцах-агонистах и антагонистах), что может говорить о сохранении равновесия за счет более выраженных перемещений ЦД относительно опоры, чем в группе, тренировавшейся с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести”.

Данный стереотип является наиболее сложным с точки зрения его формирования [32]. По теории Н.А. Бернштейна поочередно-синхронные движения обеспечиваются более высокими уровнями регуляции и требуют вовлечения более сложных механизмов. Одновременные сокращения мышц реализуются на более низких уровнях управления движениями. Следовательно, можно заключить, что тренинг с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” способствует активации таких механизмов управления движениями, которые обеспечиваются вышележащими отделами центральной нервной системы.

Необходимо отметить специфичность паттернов ритмики ЭЭГ для каждой из групп в процессе выполнения проб на сохранение равновесия. Возможность таких перестроек биоэлектрической активности мозга описана при различных способах биоуправления [33].

Результаты исследования биоэлектрической активности коры хорошо соотносятся с данными Е.В. Кривоноговой и др. [34], выявившими наличие разных типов изменений ЭЭГ при тренингах с БОС по кардиоритму. Обнаруженные ими типы отражают варианты интеграции нейронов в функциональных системах для обеспечения оптимизации баланса симпато- и ваготропных механизмов, что может сопровождаться разнонаправленными изменениями мощности α -, β - и θ -составляющих ЭЭГ во всех отделах головного мозга.

Согласно концепции Г.Г. Князева [35], различные аспекты управления двигательными реакциями (подготовка, выполнение и торможение движения, “моторное внимание” и другие) связаны с активностью различных осцилляторных систем мозга. В частности, существует специфическая связь β -активности с торможением двигательных реакций, что подтверждает взаимную независимость процессов, обеспечивающих активацию и торможение движений. Полученные нами результаты хорошо соотносятся с данной концепцией – можно полагать, что вариант биоуправления по параметру “прилагаемые усилия в

положении поиска динамического равновесия” в наибольшей степени задействует осцилляторные системы мозга, способствуя оптимальному сочетанию процессов возбуждения и торможения, за счет чего и обеспечиваются наилучшая результативность тренировки.

По поводу трактовки физиологической значимости различных диапазонов биоэлектрической активности коры головного мозга в литературе нет единого мнения. В то же время есть доказательства связи определенных ее паттернов с формированием двигательных навыков [36]. Очевидно, что применение традиционных форм тренировки в нашем случае не позволило за период исследования добиться заметных нейрофизиологических перестроек. Об этом также свидетельствуют результаты, полученные Л.П. Черапкиной [2]: она показала, что при традиционных видах тренировок различия в характеристиках фоновой ЭЭГ между группами спортсменов могут регистрироваться даже в тех случаях, когда эффективность нагрузки была одинаковой. Напротив, применение тренажеров с БОС привело к достоверным изменениям в параметрах ЭЭГ. Характерная для обоих методов тренировки с БОС активация высокочастотной β -активности в затылочных отведениях трактуется как признак напряжения, сосредоточенности на выполняемом действии и ассоциируется с формированием спортивного мастерства. Сходная картина описана в ряде работ [37, 38], показывающих возможность формирования специфических паттернов ЭЭГ при тренировках различной направленности.

Относительно активности α -диапазона ситуация выглядит противоречивой [35, 39]. С одной стороны, для активной деятельности чаще характерно снижение данного компонента ЭЭГ, что может трактоваться как проявление эффекта десинхронизации, повышение тонуса коры и активности ретикулярной формации, десинхронизирующей основной ритм ЭЭГ. С другой стороны, есть данные об усилении активности α -диапазона при сочетании физических нагрузок с выполнением когнитивных задач. В этом случае происходит снижение напряжения коры, акцент на усиление деятельности срединных, диэнцефальных структур, переход в режим внутренней сосредоточенности на висцеральных ощущениях, активизация процессов внимания [40]. Можно предположить, что выполнение упражнений с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” требует большего вовлечения нейрональных ансамблей, ответственных за процессы проприоцептивного восприятия, вегетативной регуляции, удержания внимания, а также за формирование адаптивной индивидуальной стратегии при биоуправлении.

По всей видимости, результатом выявленных особенностей механизмов реализации эффектов тренировок с БОС по различным параметрам, являются различия в эффективности этих тренировок, в успешности формирования ряда важных навыков у спортсменов. Полученные результаты позволяют определить различия механизмов, лежащих в основе стратегии решения задач на равновесие и координацию, которая формируется у исследуемых после различных видов тренинга, в том числе тренировок с БОС (рис. 7). БОС в процессе тренировок способствует ускоренному формированию навыков решения задач на сохранение равновесия посредством развития системы нервно-мышечной регуляции движений: появлению выраженных очагов концентрации на уровне коры головного мозга и синхронизированной работе участвующих в сохранении равновесия мышечных групп. Также наблюдается усиление чувствительности проприоцептивного анализатора, позволяющее выполнять движения более точно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют заключить, что тренировки с биологической обратной связью способствуют ускоренному формированию навыка сохранения равновесия. После тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” наблюдается более быстрое развитие умения сохранять статическую устойчивость во время отвлечения на выполнение параллельных мыслительных операций, чем в тренировках с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести”, что характеризует данный вариант тренировок как более эффективный, особенно в положении с закрытыми глазами.

Тренинги с использованием БОС позволяют быстрее развить проприоцептивную чувствительность, способность дифференцировать прикладываемые усилия без участия зрительного анализатора, а также улучшить межмышечную координацию и мышечную память. После тренировок с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести” развитие чувства равновесия происходит за счет повышения эффективности контроля за положением ЦД, тогда как после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” успешнее формируются умения сохранять статическую устойчивость во время отвлечения на выполнение параллельных мыслительных операций, координировать работу мышц, а также корректно дозировать прикладываемые усилия.

Характерной особенностью биоэлектрической активности мышц голени при сохранении статического равновесия после тренинга с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести”

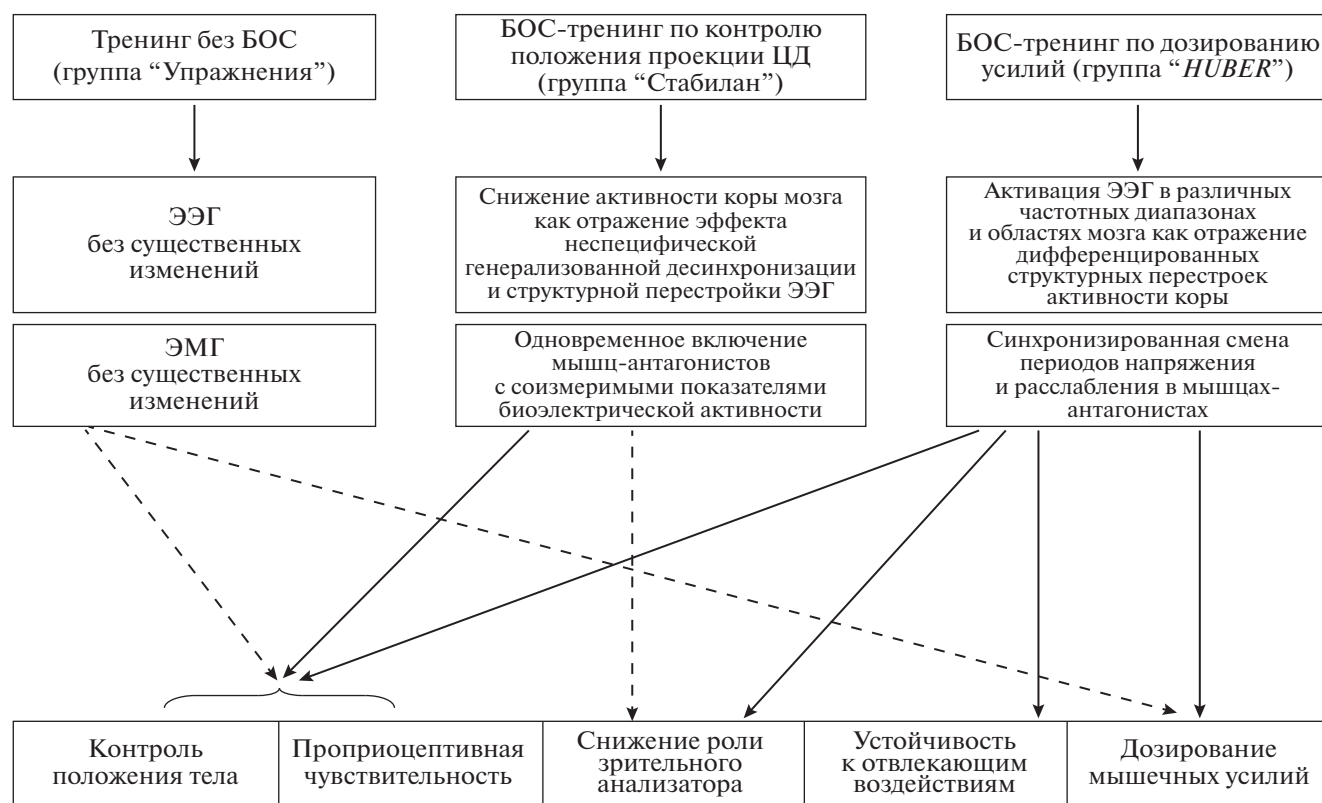


Рис. 7. Физиологическая характеристика и эффективность различных видов тренинга.

является включение в работу мышц голени в статическом режиме (одновременное включение мышц-антагонистов с соизмеримыми показателями биоэлектрической активности). В то же время после тренинга с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия” наблюдается включение в работу мышц голени в динамическом режиме (с синхронизированной сменой периодов напряжения и расслабления в мышцах-антагонистах).

Отмечается более выраженное влияние тренингов с БОС на частотные и мощностные характеристики ЭЭГ в сравнении с традиционными тренировками. Тренировки с БОС по параметру “положение проекции центра тяжести” сопровождаются снижением мощности ЭЭГ, как отражением эффекта неспецифической генерализованной десинхронизации и структурной перестройки ЭЭГ-ритмов в сравнении с тренингом с БОС по параметру “прилагаемые усилия в положении поиска динамического равновесия”, который способствовал более специфической по частотным характеристикам и пространственной локализации активации ЭЭГ, что отражало более дифференцированные и направленные структурные перестройки активности коры головного мозга.

Полученные результаты также позволяют сформулировать ряд практических рекомендаций. Все изученные в работе методики – как с БОС, так и без БОС, направлены на формирование координационных способностей и равновесия, поэтому могут быть использованы в тех видах спорта, которые предъявляют повышенные требования именно к этим качествам. Это, прежде всего, единоборства, многие игровые виды спорта, гимнастика, акробатика и т.д. Целесообразно применение этих методов на разных этапах спортивного совершенствования. На начальных этапах стоит начинать с обычных упражнений без БОС – этот вариант более эффективен для формирования навыков начального уровня. На среднем уровне можно использовать БОС на стабильной платформе, а у более квалифицированных спортсменов целесообразно использовать “HUBER” – эта методика способствует формированию навыков более высокого уровня и в большей степени вовлекает в их формирование ресурсы вышележащих отделов нервной системы.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Биологического института Нацио-

нального исследовательского Томского государственного университета (Томск).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено при поддержке Программы развития ТГУ (“Приоритет-2030”).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Володенко Д.В. Опыт применения БОС—тренинга в комплексной реабилитации пожарных и спасателей // Современные проблемы гражданской защиты. 2016. № 2(19). С. 32.
2. Черепкина Л.П. Факторы успешности нейробиоуправления у спортсменов // Психология. Психофизиология. 2019. № 2. С. 80.
3. Гаевая Ю.А., Медведева Е.В., Ильин А.А., Каплевич Л.В. Коррекция пострурального баланса у людей старшего возраста методом стабиллографической тренировки с биологической обратной связью // Теория и практика физической культуры. 2020. № 11. С. 43.
4. Датченко С.А. Предпосылки возникновения и история развития современной психофизиологической технологии БОС // Личность, семья и общество: вопросы педагогики и психологии. 2015. № 2(49). С. 7.
5. Бернштейн Н.А. Физиология движений и активность. М.: Наука, 1990. 309 с.
6. Григорьев А.И., Козловская И.Б., Шенкман Б.С. Роль опорной афферентации в организации тонической мышечной системы // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2004. Т. 90. № 5. С. 507. Grigor'ev A.I., Kozlovskaja I.B., Shenkman B.S. [The role of support afferents in organisation of the tonic muscle system] // Ross. Fiziol. Zh. Im. I.M. Sechenova. 2004. V. 90. № 5. P. 508.
7. Peterka R. Sensorimotor integration in human postural control // J. Neurophysiology. 2002. V. 88. № 3. P. 1097.
8. Forbes P.A., Chen A., Blouin J.-S. Sensorimotor control of standing balance / Balance, Gait, and Falls // Handb. Clin. Neurol. 2018. V. 159. P. 61.
9. Dubbioso R., Manganelli F., Siebner H.R., Lazzaro V.Di. Fast Intracortical Sensory-Motor Integration: A Window Into the Pathophysiology of Parkinson's Disease // Front. Hum. Neurosci. 2019. V. 13. P. 111.
10. Jaakkola T., Anthony W. Differences in the Motor Coordination Abilities Among Adolescent Gymnasts, Swimmers, and Ice Hockey Players // Hum. Mov. 2017. V. 18. № 1. P. 44.
11. Моисеенко В.А. Применение БОС в спорте // Вопросы устойчивого развития общества. 2020. № 9. С. 507.
12. Nelson Ferguson K., Hall C. Sport Biofeedback: Exploring Implications and Limitations of Its Use // Sport Psychol. 2020. V. 34. № 3. P. 232.
13. Perry F., Shaw L., Zaichkowsky L. Biofeedback and Neurofeedback in Sports // Biofeedback. 2011. V. 39. № 3. P. 95.
14. Pusenjak N., Grad A., Tušak M. et al. Can biofeedback training of psychophysiological responses enhance athlete's sport performance? A practitioner's perspective // Phys. Sportsmed. 2015. V. 43. № 3. P. 287.
15. Дёмин Д.Б., Поскотинова Л.В. Физиологические основы методов функционального биоуправления // Экология человека. 2014. Т. 21. № 9. С. 48. Demin D.B., Poskotinova L.V. [Physiological basis of the functional biofeedback methods] // Ekologiya Cheloveka (Hum. Ecol.) 2014. V. 21. № 9. P. 48.
16. Дёмин Д.Б., Поскотинова Л.В., Кривоногова Е.В. ЭЭГ-реакции в динамике кардиобиоуправления у подростков с различным вегетативным тонусом, проживающих на северных широтах // Экология человека. 2016. Т. 23. № 10. С. 23. Demin D.B., Poskotinova L.V., Krivonogova E.V. [EEG-reaktsii v dinamike kardiobioupravleniya u podrostkov s razlichnym vegetativnym tonusom, prozhivayushchikh na severnykh shirotakh] // Ekologiya Cheloveka (Hum. Ecol.) 2016. V. 23. № 10. P. 23.
17. Sang-Hyuk P., Seunghyun H., Sang—Mi L. Pilot Application of Biofeedback Training Program for Racket Sports Players // Ann. Appl. Sport Sci. 2020. V. 8. № 4. P. 1.
18. Баулина О.В., Истомина Т.В. Применение мультипараметрической биологической обратной связи в спортивной медицине // Биотехносфера. 2014. № 3(33). С. 50. Baulina O.V., Istomina T.V. The use of multi bos in sports medicine // Biotekhnosfera. 2014. № 3(33). P. 50.
19. Bonnette S., DiCesare C.A., Kiefer A.W. et al. A Technical Report on the Development of a Real—Time Visual Biofeedback System to Optimize Motor Learning and Movement Deficit Correction // J. Sports Sci. Med. 2020. V. 19. № 1. P. 84.
20. Kiefer A.W., Kushner A.M., Groene J. et al. A Commentary on Real—Time Biofeedback to Augment Neuromuscular Training for ACL Injury Prevention in Adolescent Athletes // J. Sports Sci. Med. 2015. V. 14. № 1. P. 1.
21. Kos A. Biofeedback in Sport and Rehabilitation / 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). Budva, Montenegro, June 10–14, 2019. P. 1.
22. Марьенко И.П., Лухачев С.А. Стабилометрическая характеристика процесса перехода от циклической к сложнокоординаторной деятельности у спортсменов // Неврология и нейрохирургия. Восточная Европа. 2013. № 3(19). С. 78.
23. Boloban V., Sadowski J., Niżnikowski T., Wiśniowski W. Didactic technology in mastering complex motor tasks // Coordination Motor Abilities in Scientific Research. 2010. V. 33. P. 112.

24. *Boloban V., Sadowski J., Niznikowski T.* Functional pedagogical equation as the technology of training acrobatic exercises of balance motion type of the system of bodies // *Coordination Motor Abilities in Scientific Research*. 2010. V. 33. P. 130.
25. *Попадюха Ю.А., Жданович Я.И., Литус И.В., Пеценко Н.И.* Опыт применения компьютерной системы HUBER Motion Lab в оздоровлении и укреплении опорно-двигательного аппарата студентов // *Физическое воспитание студентов*. 2012. № 6. С. 88.
26. *Косачев В.Е.* Стабилография в системе психофизиологического мониторинга // *Известия Южного федерального университета*. Технические науки. 2000. № 4(18). С. 22.
27. *Миниханов В.А.* Развитие координационных способностей в процессе спортивной тренировки занимающихся спортивными видами единоборств с применением специфических двигательных тренировочных заданий // *Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта*. 2018. Т. 13. № 2. С. 63.
Minikhanov V.A. Coordinating skills development during sports training process of people going in for combat sports using specific motor training tasks // *Russian J. Physical Education and Sport*. 2018. V. 13. № 2. P. 63.
28. *Анохин П.К.* Узловые вопросы теории функциональной системы. М.: Наука, 1980. 195 с.
29. *Бирюкова Е.А., Погодина С.В., Джелдубаева Э.Р., Алексанянц Г.Д.* Технологии биоуправления в оптимизации двигательного-когнитивных возможностей спортсменов-ориентировщиков // *Теория и практика физической культуры*. 2020. № 11. С. 47.
30. *Lyakh V.* The relationship between the concepts of motor skill, habit and technique of physical exercises in the system of learning motor activities // *Coordination Motor Abilities in Scientific Research*. 2010. V. 33. P. 64.
31. *Miller J.F., Sadowski J., Miller M.* Correlation between coordination motor abilities and technical skills of Olympic style taekwondo athletes at different levels of proficiency // *Coordination Motor Abilities in Scientific Research*. 2010. V. 33. P. 234.
32. *Shestakov M., Abalyan A., Fomichenko T. et al.* Examination of coordination structure in sports characterized by asymmetric movements // *Coordination Motor Abilities in Scientific Research*. 2010. V. 33. P. 174.
33. *Cherapkina L.P.* Bioelectric activity of the brain and the predictive importance of effects of neurobiofeedback course at athletes // *J. Hum. Sport Exerc.* 2018. № 13 (Proc2). P. S370.
34. *Кривоногова Е.В., Поскотинова Л.В., Дёмин Д.Б.* Индивидуально-типологические варианты реактивности ЭЭГ-колебаний при биоуправлении параметрами ритма сердца у подростков и молодых лиц на Севере // *Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2015. Т. 65. № 2. С. 203.
Krivotnogova E.V., Poskotinova L.V., Demin D.B. [Individual Types Reactivity of EEG Oscillations in Effective Heart Rhythm Biofeedback Parameters in Adolescents and Young People in the North] // *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im. I.P. Pavlova*. 2015. V. 65. № 2. P. 203.
35. *Левин Е.А., Савостьянов А.Н., Лазаренко Д.О., Князев Г.Г.* Роль осцилляторных систем головного мозга человека в активации и торможении двигательных реакций // *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук*. 2007. Т. 12. № 3. С. 64.
36. *Фекличева И.В., Чунеева Н.А., Захаров И.М. и др.* Взаимосвязь физической активности и функциональной связанности мозга // *Человек. Спорт. Медицина*. 2019. № 4. С. 50.
37. *Cheron G., Petit G., Cheron J. et al.* Brain oscillations in sport: Toward EEG biomarkers of performance // *Front. Psychol.* 2016. V. 7. P. 246.
38. *Park J.L., Fairweather M.M., Donaldson D.I.* Making the case for mobile cognition: EEG and sports performance // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2015. V. 52. P. 117.
39. *Balkis Z., Hussain Z., Iza I.* Alpha and beta EEG brainwave signal classification technique: A conceptual study / 2014 IEEE 10th International Colloquium on Signal Processing and Its Applications (CSPA): conference proceedings. Kuala Lumpur, Malaysia, 07–09 March, 2014. P. 233.
40. *Ji L., Wang H., Zheng T.Q. et al.* Correlation analysis of EEG alpha rhythm is related to golf putting performance // *Biomed. Signal Process. Control*. 2019. V. 49. P. 124.

Physiological Features of Motor Coordination Formation Based on Training with Biological Feedback

A. V. Illarionova^a, S. G. Krivoshchekov^c, A. A. Ilyin^d, L. V. Kapilevich^{a, b, *}

^aNational Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

^bNational Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

^cScientific Research Institute of Neurosciences and Medicine, Novosibirsk, Russia

^dTomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

*E-mail: kapil@yandex.ru

The aim of this study was to study the physiological features of the formation of balance and coordination abilities based on training with biofeedback for various parameters. The study involved 60 girls aged 18–20 years, not involved in sports and included in the main medical group (first health group). The results of the testing carried out in the selection of participants in the three groups were insignificant. 20 girls trained according to a program that included a set of exercises to develop the sensitivity of the vestibular analyzer and

proprioceptive sensitivity. 20 girls were engaged in computer stabilization analyzer “Stabilan-01-2” using feedback on the parameter “position of the projection of the center of gravity”. The remaining 20 subjects studied on the “HUBER” apparatus using feedback on the “applied efforts” parameter. Classes were held 3 times a week for a month, 12 workouts in total. Before the start of the training course, as well as after it, the girls underwent comprehensive testing using the methods of electromyography, stabilometry, EEG and dynamometry on the “HUBER” apparatus. It was found that training with biofeedback contributes to the accelerated formation of the skill of maintaining balance, allows faster development of proprioceptive sensitivity, the ability to differentiate applied efforts without the participation of a visual analyzer, as well as improve intermuscular coordination and muscle memory. A characteristic feature of the bioelectrical activity of the leg muscles while maintaining static balance after training with biofeedback according to the parameter “position of the projection of the center of gravity” is the inclusion of the leg muscles in the static mode (simultaneous activation of antagonist muscles with comparable indicators of bioelectric activity). At the same time, after training with biofeedback according to the parameter “applied efforts in the position of seeking dynamic balance”, the lower leg muscles are activated in a dynamic mode (with a synchronized change in periods of tension and relaxation in the antagonist muscles). There is a more pronounced effect of training with biofeedback on the frequency and power characteristics of the EEG in comparison with traditional training. The results obtained also make it possible to formulate a number of practical recommendations. All the methods studied in the work – both with biofeedback and without biofeedback, are aimed at the formation of coordination abilities and balance; therefore, they can be used in those sports that make increased demands on these qualities. It is advisable to use these methods at different stages of sports improvement.

Keywords: biofeedback, movement regulation, coordination, balance, intermuscular interactions, muscular-articular feeling.