

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

Решетникова Варвара Викторовна

Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы

**«Исследование механизмов организации воображения движений
конечностей при управлении системами ”интерфейс мозг-компьютер”»**

06.06.01 - Биологические науки
03.01.01 – Физиология

Научный руководитель:
д.б.н. Боброва Елена Вадимовна

Санкт-Петербург

2022

Содержание

Актуальность темы исследования.....	3
Цель и задачи исследования.....	4
Научная новизна.....	5
Положения, выносимые на защиту.....	6
Теоретическая и практическая значимость.....	8
Материалы и методы.....	8
Основные результаты и обсуждения.....	17
Заключение.....	44
Выводы.....	45
Список публикаций по теме исследования.....	46
Дополнительные публикации.....	47
Список литературы.....	52

Актуальность темы исследования

Воображение движений – это мысленное выполнение движений, не сопровождающееся мышечной активностью. Этот подход широко используется в профессиональном спорте, музыке и нейрореабилитации людей с парезом конечностей разной степени выраженности для ментальной тренировки двигательных функций. Способность нервной системы воображать движения пока мало изучена, поэтому фундаментальные нейрофизиологические исследования позволяют глубже понять механизмы организации движений и нейропластичности. При воображении движений может быть использована обратная связь в виде системы «интерфейс мозг-компьютер» (ИМК), благодаря чему возможно не только управление вспомогательными устройствами (ортезы, экзоскелеты), но и восстановление двигательных функций за счет активации нейропластических механизмов. Известно, что личностные характеристики могут влиять на успешность воображения движений, а также что активность право- и левополушарных структур мозга может отличаться в зависимости от личностных характеристик. Однако неизвестно, как успешность воображения движений связана с личностными характеристиками и с межполушарной асимметрией. Также мало освещенным в литературе остается вопрос о механизмах обучения воображению движений – как меняется активность нейросетей, обеспечивающих воображение конкретных движений, в ходе обучения. Важным неизученным фундаментальным вопросом в исследовании центральных механизмов формирования воображения движений является вопрос о воздействии спинально-кортикальной афферентации: каковы афферентные и стимуляционные влияния на уровне спинного мозга на кортикальный уровень воображения движений.

Цель и задачи исследования

Цель исследования –исследовать центральные механизмы формирования воображения движений верхних и нижних конечностей, их зависимости от личностных характеристик, межполушарной асимметрии и обратных связей при афферентных воздействиях и при стимуляционных воздействиях на уровне спинного мозга.

Для достижения этой цели были поставлены следующие *задачи*:

1. Оценить связь успешности управления ИМК, оцененную по точностиклассификации сигналов мозга при кинестетическом воображении движений, с личностными характеристиками;
2. Выявить зависимость успешности управления ИМК от факторов, связанных с межполушарной асимметрией;
3. Проанализировать влияние обучения на успешность управления ИМК;
4. Проанализировать и сопоставить особенности воображения движений верхних и нижних конечностей – провести анализ успешности воображения движений, оцененной по точности классификации сигналов мозга при кинестетическом воображении движений правой и левой руки, правой и левой ноги и локомоции; оценить взаимосвязи между личностными характеристиками пользователей и успешностью воображения этих движений, особенности обучения воображению этих движений;
5. Изучить особенности спинально-кортикалной регуляции воображения движений при афферентных и стимуляционных воздействиях на уровне спинного мозга.

Научная новизна

В настоящее время стремительно развивающейся областью является ИМК – система обмена информацией между компьютером и мозгом. В литературе имеются многочисленные сведения о том, что личностные характеристики связаны с ЭЭГ-активностью разных отделов мозга в различных частотных диапазонах, в ряде работ указывается асимметричное положение областей мозга, активность которых коррелирует с личностными характеристиками. Вместе с тем, в исследованиях механизмов воображения движений нет сведений о том, как успешность воображения движений при разных личностных характеристиках связана с межполушарной асимметрией.

Мало изученным является вопрос о динамике обучения управлению ИМК, основанным на воображении движений как верхних, так и нижних конечностей. Большая часть всех исследований, в которых можно найти информацию о ходе обучения управлению ИМК, посвящены проверке гипотез о влиянии тренинга (Stieger et al., 2021) или дополнительной обратной связи – при успешном воображении движений запускается либо функциональная электростимуляция (ФЭС) (Irimia et al., 2018; Qui et al., 2018), либо движение ортезов (Buch et al., 2008). В подавляющем большинстве работ принимали участие постинсультные пациенты с различными нарушениями движений (Irimia et al., 2018; Prasad et al., 2010; Buch et al., 2008; Perdikis et al., 2018; Qui et al., 2018) и лишь в нескольких – здоровые испытуемые (Stieger et al., 2021; Corsi et al., 2019). В большинстве исследований лишь у части пациентов наблюдались значимые улучшения точности классификации при обучении.

В то время как существует широкий пласт исследований по использованию воображения движений верхних конечностей для их восстановления (см., например, (Belda-Lois et al. 2011; Frolov et al. 2017), восстановление функций нижних конечностей с помощью воображения

движений – сравнительно недавно развивающееся направление исследований (см. обзор Боброва и др., 2019). В литературе не обнаружено сопоставления успешности воображения движений верхних и нижних конечностей, что важно для оценки возможности нейрореабилитации нижних конечностей с использованием воображения движений.

Абсолютно новым подходом в нейрореабилитации является разработанная система, сочетающая в себе чрескожную электрическую стимуляцию спинного мозга (ЧЭССМ) и механотерапию, запускаемую от сигналов ИМК, основанного на воображении движений нижних конечностей. ЧЭССМ – это неинвазивный метод, вызывающий активацию разных отделов спинного мозга, стимулирующий и облегчающий движения конечностей, в частности у пациентов с нарушениями движений. Механотерапия представляет собой пассивное передвижение конечностей пациента, что само по себе оказывает терапевтический эффект, а при запуске механотерапии при воображении соответствующего движения замыкается сенсомоторная петля, что способствует усиленной нейрореабилитации двигательной функции.

Положения, выносимые на защиту

1. Выявлена факторы, влияющие на процессы воображения движений при управлении ИМК, успешность управления которым оценивается по точности классификации сигналов мозга при кинестетическом воображении движений конечностей: личностные характеристики, межполушарная асимметрия, обучение, тип воображаемого движения, наличие обратных связей;
2. Точность классификации сигналов мозга при воображении движений правой и левой руки не различается, однако связана с различными личностными характеристиками, оптимальными для управления ИМК. Скрытая леворукость оказывает влияние на эти связи.

3. В процессе 10-дневного обучения управлению ИМК при воображении движений кистей и стоп имеет место рост точности классификации к 3-му дню обучения с дальнейшим ее уменьшением и последующим возрастанием, однако значимых различий в точности классификации между первым и последним днями для всех типов воображаемых движений не выявлено. Успешность воображения движений кистей, стоп и локомоции различна в первый, второй и пятый дни обучения;
4. Для каждого дня обучения управлению ИМК, основанного на воображении движений, характерен свой набор личностных характеристик, являющихся оптимальными для успешного воображения каждого типа исследованных движений;
5. Афферентный восходящий поток, возникающий вследствие электрической стимуляции спинного мозга и механотерапии, влияет на активность структур мозга, обеспечивающих воображение движений, увеличивая точность классификации сигналов мозга при воображении движений левой, но не правой стопы, что свидетельствует о роли фактора межполушарной асимметрии при воображении движений.

Теоретическая и практическая значимость

Значимость исследования определяется современным состоянием проблемы изучения механизмов воображения движений, а также их психофизиологических коррелятов. Полученные данные можно использовать для разработки индивидуального подхода к нейрореабилитации, которая базируется на применении ИМК, основанного на воображении движений. Разработка и апробирование системы, состоящей из ИМК, ЧЭССМ и

механотерапии на здоровых испытуемых является первым шагом в доклинических исследованиях и создания доказательной базы эффективности данного комплекса. Впервые изучены эффекты стимуляции спинного мозга и механотерапии не только на спинальные механизмы регуляции двигательной функции и активности мышц, но и на кортикалный уровень управления движений, что позволяет исследовать механизмы периферической обратной связи (обратный контур) при регуляции воображаемых движений. С точки зрения фундаментальной науки, выяснение механизмов обратных связей в регуляции двигательной активности на разных уровнях регуляции (спинальном и кортикалном) является чрезвычайно важной задачей.

Материалы и методы

Данная работа состоит из трех тесно взаимосвязанных частей, логически переходящих друг в друга. Первая часть посвящена изучению воображения движений верхних конечностей – наиболее широко используемому в нейрореабилитации с помощью ИМК паттерну движений – и его связей с личностными характеристиками пользователей. Во второй части сравнивается успешность воображения движений верхних и нижних конечностей с целью определить возможность использования ИМК, основанного на воображении движений ног, исследуется динамика обучению воображению движений и ее связь с личностными характеристиками пользователей ИМК. В третьей части работы представлены результаты исследования влияния обратных связей на систему, обеспечивающую воображение движений, при управлении ИМК, на основании сигнала от которого осуществляется ЧЭССМ и пассивное перемещение стопы в случае успешного воображения движения.

В исследовании использовались следующие методики:

1) Сеанс работы с ИМК, основанном на кинестетическом воображении движений верхних или нижних конечностей, включающий регистрацию

анализ ЭЭГ с определением точности классификации состояний мозга при воображении того или иного типа движений;

2) Психофизиологическое тестирование, включающее в себя пул тестов и опросников, определяющих индивидуальные особенности испытуемого;

3) Механотерапия – принудительное перемещение конечностей, активируемое в зависимости от сигнала об успешном воображении движения, формируемого на основании анализа точности классификации сигналов мозга при воображении движений;

4) ЧЭССМ–неинвазивная чрескожная электрическая стимуляция спинного мозга, адресуемая к нейронным сетям моторным пулам.

Эти методики отличались в разных типах экспериментов, что подробнее будет описано ниже.

1. Исследование механизмов воображения движений при однократном управление ИМК при воображении движений верхних конечностей.

Испытуемые. В экспериментах принимали участие 44 здоровых испытуемых (19 мужчин и 25 женщин) в возрасте 19–25 лет с ведущей правой рукой (Oldfield, 1971). 18 из 44 человек являлись скрытыми левшами. (Luria, 1947/1970).

Психофизиологическое тестирование. Личностные параметры и характеристики испытуемых оценивали комплексом специально подобранных тестов:

- 1) 16-факторный опросник Кеттелла (187 вопросов)
- 2) Тест Спилбергера-Ханина на определение личностной и ситуативной тревожности (40 вопросов)
- 3) Тест Айзенка (определение уровня нейротизма и интроверсии/экстраверсии) (57 вопросов)

- 4) Тест Брагиной-Доброхотовой (определение моторной и сенсорной асимметрии)
- 5) Тест Струпа (определения гибкости когнитивного мышления)
- 6) Тест Неккера (определение способности к длительной концентрации внимания)
- 7) Опросник о наличии опыта двигательных практик, практик концентрации внимания, игры на музыкальных инструментах и пр.
- 8) Опросник о субъективной сложности выполнения и воображения движений рук

Скрытое левшевство определялось при помощи методики Брагиной-Доброхотовой (Bragina, Dobrohotova, 1988). Для этого каждый испытуемый отвечал на три вопроса:

1. Какая рука располагается сверху при аплодировании?
2. Большой палец какой руки оказывается сверху при переплетении пальцев рук?
3. Закройте глаза и вытяните руки перед собой. Какая рука оказывается выше?

Далее вычислялся коэффициент асимметрии рук:

$$КПр = (ЕП — ЕЛ) / (ЕП + ЕЛ + ЕО) \cdot 100$$

Где КПр — коэффициент правой руки; ЕП — число приемов, в которых преобладала правая, ЕЛ — левая рука и ЕО — не было преобладания одной из рук.

Испытуемые с отрицательным значением коэффициента считались скрытыми левшами.

Сеанс работы с ИМК. Испытуемые получали инструкцию в соответствии с символами, возникающими на экране монитора в случайном порядке, воображать кинестетические (не зрительные) ощущения при подъеме и

опускании правой или левой руки с колена до уровня своего плеча, либо оставаться в состоянии покоя.

Регистрация ЭЭГ.ЭЭГ регистрировалось с помощью беспроводного электроэнцефалографа SmartBCI (производства компании “Мицар”, Санкт-Петербург), обеспечивающего возможность записи ЭЭГ с 24 отведений. Электроэнцефалограф (вес 50 г) закрепляется в непосредственной близости от места контакта электродов с поверхностью головы, отсутствие длинного шлейфа позволяет минимизировать мощность сетевых помех в регистрируемой ЭЭГ и артефакты движений.

Анализ ЭЭГ.ЭЭГ-сигналы анализировали, проводя классификацию состояний мозга в попарном асинхронном ИМК (три состояния: воображение движений левой руки (ЛР) (1), воображение движений правой руки (ПР) (2), покой (3)), основанном на десинхронизации сенсомоторного ритма при воображении движений (длительность обучения классификатора около 3 мин) (подробнее см. Волкова и др., 2017). Точность классификации оценивалась методом кросс-валидации, т.е. осуществлялось итеративное разделение каждой из пар сравниваемых состояний (сравнивали следующие состояния: 1 vs 2, 1 vs 3, 2 vs 3) на обучающую и тестовую выборки, обучение классификатора проводилось на обучающей выборке, качество классификации оценивалось по тестовой выборке (off-line). Точность классификации оценивалась по вероятности распознавания именно того ментального состояния, которое задавалось инструкцией.

Статистический анализ данных. Оценку зависимости точности управления ИМК от личностных особенностей проводили методами корреляционного и факторного анализа. Непараметрическим критерием Манна-Уитни оценивали достоверность различий между подгруппами испытуемых с высоким и низким значением каждой из личностных особенностей. Вследствие того, что выборки были невелики, а не все распределения подчинялись нормальному закону, при проведении корреляционного анализа рассчитывали

ранговый коэффициент корреляции Спирмена (непараметрический), и кроме того анализировали данные параметрическим критерием Пирсона.

2. Исследование механизмов воображения движений при обучении управлению ИМК, основанному на воображении движений верхних и нижних конечностей.

Испытуемые. Количество испытуемых, принявших участие в эксперименте, – 10 человек в возрасте 21–35 лет. Каждый испытуемый принял участие в 10 сессиях (1 сессия в день в течение 10 дней подряд) воображения движений с обратной связью в виде ИМК в трёх конфигурациях: при представлении движений кистей, стоп и локомоции.

Психофизиологическое тестирование. Комплекс тестов аналогичен эксперименту части 1 с добавлением следующих тестов:

- 1) Тест Олдфилда (определение рукости – «handedness»)
- 2) 5-факторный опросник личности («большая пятёрка», определяет пять основных личностных характеристик) (75 вопросов)
- 3) Тест включенных фигур Готтшальдта (полезависимость-поленезависимость)
- 4) Опросник внимательности и осознанности (Mindful Attention Awareness Scale, MAAS) (15 вопросов)

Сеанс работы с ИМК. Каждая из 10 сессий состояла из 3 сеансов управления ИМК: при воображении движений кистей, стоп и локомоции, которые чередовались в псевдослучайном порядке. Испытуемые получали инструкцию в соответствии с символами, возникающими на экране монитора в случайном порядке, воображать движения кинестетически (не зрительно). Воображение движений включало в себя воображение движений кистей (сжатие и разжатие пальцев), стоп (сгибание и разгибание в голеностопном суставе) и ног (локомоция). Перед началом каждой сессии

испытуемым было сказано осуществлять вышеуказанные движения и обращать при этом внимание на кинестетические ощущения.

Регистрация ЭЭГ. ЭЭГ регистрировалась с помощью беспроводного электроэнцефалографа SmartBCI (производства компании “Мицар”, Санкт-Петербург), обеспечивающего возможность записи ЭЭГ с 32 отведений. Электроэнцефалограф (вес 50 г) закрепляется в непосредственной близости от места контакта электродов с поверхностью головы, отсутствие длинного шлейфа позволяет минимизировать мощность сетевых помех в регистрируемой ЭЭГ и артефакты движений.

Анализ ЭЭГ. Анализ ЭЭГ-сигналов был основан на десинхронизации сенсомоторного ритма и обеспечивал классификацию трех состояний мозга: при воображении движений левой конечности (или локомоции, начинающейся с левой ноги) (1), при воображении движений правой конечности (или локомоции, начинающейся с правой ноги) (2), покой (3). Для обучения классификатора использовались первые 3 блока, последующие блоки использовались для тестирования классификатора и дообучения. Для выделения из сигнала значимых для классификации признаков применялся метод common spatial pattern. Полученные признаки использовались для обучения и тестирования с помощью квадратичного дискриминантного анализа. Для оценки качества классификации строилась матрица качества $Q = (q_{ij})$, элементами которой являлись оценки вероятностей того, что при инструкции испытуемому выполнять задачу j классификатор распознавал выполнение задачи i . В ходе эксперимента после обучения классификатора в случае успешного распознавания именно того состояния, которое задавалось инструкцией, участник эксперимента получал обратную связь в виде растущего в центре экрана зеленого кружка. Ещё одним численным показателем качества классификации P было среднее от диагональных элементов матрицы Q . $P = 1$ при идеальной классификации и $P = 1/K$ при случайной классификации и числе классов K (уровень случайного гадания, chance-level, 0.33 в нашем

эксперименте). Величина P - вероятность распознавания именно того ментального состояния, которое задавалось инструкцией, использовалась в этом исследовании для оценки точности классификации.

Статистический анализ данных. Методами статистики была осуществлена оценка взаимосвязей между результатами анализа ЭЭГ (методом оценки точности классификации) и результатами психофизиологического тестирования (оценивающего личностные характеристики). Оценка зависимости точности классификации сигналов мозга при воображении движений от личностных характеристик была проведена методом корреляционного анализа: были рассчитаны ранговый коэффициент корреляции Спирмена (непараметрический) и параметрический критерий Пирсона. Проверку влияния типа воображаемого движения (кисти, стопы и локомоция) на точность классификации проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа для зависимых переменных по всем сессиям после предварительной проверки гипотезы об отклонении от нормальности с использованием критерия Колмогорова-Смирнова. Гипотезу о наличии линейного тренда оценок точности классификации в зависимости от дня обучения проверяли при помощи линейного регрессионного анализа.

3. Исследование механизмов воображения движений при управлении ИМК в условиях ЧЭССМ и пассивного перемещения стопы.

Испытуемые. В исследовании приняли участие 11 здоровых испытуемых (7 женщин и 4 мужчин) в возрасте от 18 до 45 лет, которые впервые управляли ИМК.

Психофизиологическое тестирование. Комплекс тестов тот же, что и в экспериментальной части 2.

Регистрация ЭМГ. ЭМГ регистрировалась при помощи беспроводного электромиографа DELSYSTrigno. Электроды располагались накожно над

областями следующих мышц левой и правой ног: rectus femoris, biceps femoris, tibialis anterior и gastrocnemius.

Применение ЧЭССМ. Электроды для ЧЭССМ (стимулятор Неостим-5, ООО «Косима») располагались накожно на расстоянии 1.5 см справа и слева от срединной линии позвоночника между позвонков L1 и L2 – для стимуляции экстензорных моторных пулов. Проводилась ритмическая стимуляция модулированными (5 кГц) бифазными импульсами, длительностью 1 мс, с частотой 15 Гц. Величина интенсивности стимуляции определялась индивидуально и составляла около 10–30 мА.

Механотренажер БиоКин. Конструкция механотренажера БиоКин (ООО «Косима») включает два блока для осуществления перемещения нижних конечностей: один обеспечивает сгибание в голеностопном суставе (актуально для реабилитации нарушений движений дистальных отделов конечностей, «висячая стопа»), другой - в коленном и тазобедренном суставах. Совместное использование этих двух блоков обеспечивает осуществление движений, имитирующих шагание. В данной экспериментальной парадигме БиоКин обеспечивает пассивное тыльное сгибание стопы в случае успешного воображения движения, оцененного по точности классификации сигналов мозга благодаря работе ИМК. Чем выше точность классификации состояний мозга, вычисляемая классификатором и отражающая эффективность воображения движений, тем больше угол сгибания в голеностопном суставе.

Получение контрольных записей. Перед сеансом работы с ИМК проводилась регистрация ЭЭГ и ЭМГ при открытых глазах в течение 1 минуты при выполнении каждого следующего задания:

- 1) Нахождение в расслабленном состоянии с открытыми глазами без выполнения каких-либо действий (контроль);
- 2) Пассивное тыльное сгибание правой и левой стопы поочередно при помощи механотренажера БиоКин;

- 3) Реальное тыльное сгибание стоп в том же ритме с концентрацией внимания на кинестетических ощущениях;
- 4) Кинестетическое воображение данного движения.

Сеанс работы с ИМК. Каждый испытуемый принял участие в одной сессии, состоящей из 4 сеансов управления ИМК. Первый сеанс включал в себя управление ИМК только со зрительной обратной связью. Следующие три сеанса осуществлялись в псевдослучайном порядке:

- 1) ИМК со зрительной обратной связью с запуском ЧЭССМ при воображении движений;
- 2) ИМК со зрительной обратной связью с запуском пассивного движения стопы (механотренажер БиоКин) в случае успешного воображения движения;
- 3) Совместное использование ИМК со зрительной обратной связью, ЧЭССМ и пассивного перемещения стопы.

Анализ ЭЭГ. Метод классификация сигналов мозга идентичен методу из части 2.

Статистический анализ данных. Была проведена экспертная и статистическая оценка данных. Значимость отличий между условиями при оценке ЭМГ и точности классификации оценивалась Т-критерием Вилкоксона.

Основные результаты и обсуждение

1. Исследование механизмов воображения движений при однократном управлении ИМК при воображении движений верхних конечностей.

1.1. Средняя точность классификации сигналов мозга при работе с ИМК

Средняя точность классификации (ТК) сигналов мозга по условиям ПР-покой, ЛР-покой и ЛР-ПР при работе с ИМК в первом сеансе составила $65.6 \pm 8.3\%$ ($m \pm SD$). ТК ПР-ЛР значимо меньше, чем ЛР-покой и ПР-покой ($62.9 \pm 7\%$, $66.2 \pm 9.1\%$ и $67.7 \pm 8\%$, соответственно). Минимальная ТК составила 49.5%, что не превышает уровень случайного гадания (chancelevel) (это наблюдалось лишь в 1 случае из 132), а максимальная - 90%.

1.2. Корреляционный анализ

В результате анализа были выявлены значимые корреляционные связи ТК с личностными характеристиками, оцененными по тесту Кеттелла (рис.1). Эти связи отличались в зависимости от того, воображалось движение ПР или ЛР.

ТК ПР-покой статистически значимо положительно связана с личностными характеристиками, которые характеризуются факторами F2 (экстраверсия), F (экспрессивность) и I (чувствительность). ТК ПР-покой для подгрупп с высоким и низким значением факторов экстраверсия и чувствительность статистически достоверно различаются по критерию Манна-Уитни – она выше в подгруппах с высокими значениями этих признаков. Следовательно, воображение движений ПР более успешно у экстравертов, чем у интровертов; у более беспечных, спонтанных и экспрессивных, чем у сдержанных, серьезных и погруженных в себя людей; у более чувствительных и интуитивных, чем у жестких, уверенных в себе, серьезных утилитаристов.

Для фактора I (чувствительность) показана значимая отрицательная связь с ПР-ЛР. Это означает, что у более чувствительных индивидуумов состояния мозга при воображении движений ЛР и ПР отличаются меньше, чем у менее чувствительных, хотя, как упоминалось выше, чувствительность положительно связана с ТК ПР-покой.

ТК ЛР-покой не имеет статистически значимых корреляционных связей с вышеупомянутыми личностными характеристиками, но значимо негативно связана с факторами M (мечтательность) и G (высокая нормативность). Это

означает, что воображение движений ЛР более успешно у практических реалистов, чем у людей, склонных к абстрактным размышлениям; у игнорирующих правила нонконформистов и скептиков, чем у добросовестных послушных моралистов и консерваторов. Для фактора G также имеет место тенденция ($p = 0.069$) значимости различий между подгруппами с высоким и низким значением этого фактора по критерию Манна-Уитни.

Также как и фактор G, фактор Q1 (радикализм, открытость к изменениям) выявил значимую положительную корреляционную связь с ЛР-покой, а также значимые различия ПР-покой в подгруппах с высокими и низкими значениями данного признака по критерию Манна-Уитни ($p < 0.05$). Следовательно, открытые для перемен люди, склонные к эксперименту, анализу, критике, либерализму, свободомыслию и гибкости, а не традиционалисты и консерваторы лучше воображают воображение движения как ПР, так и ЛР.

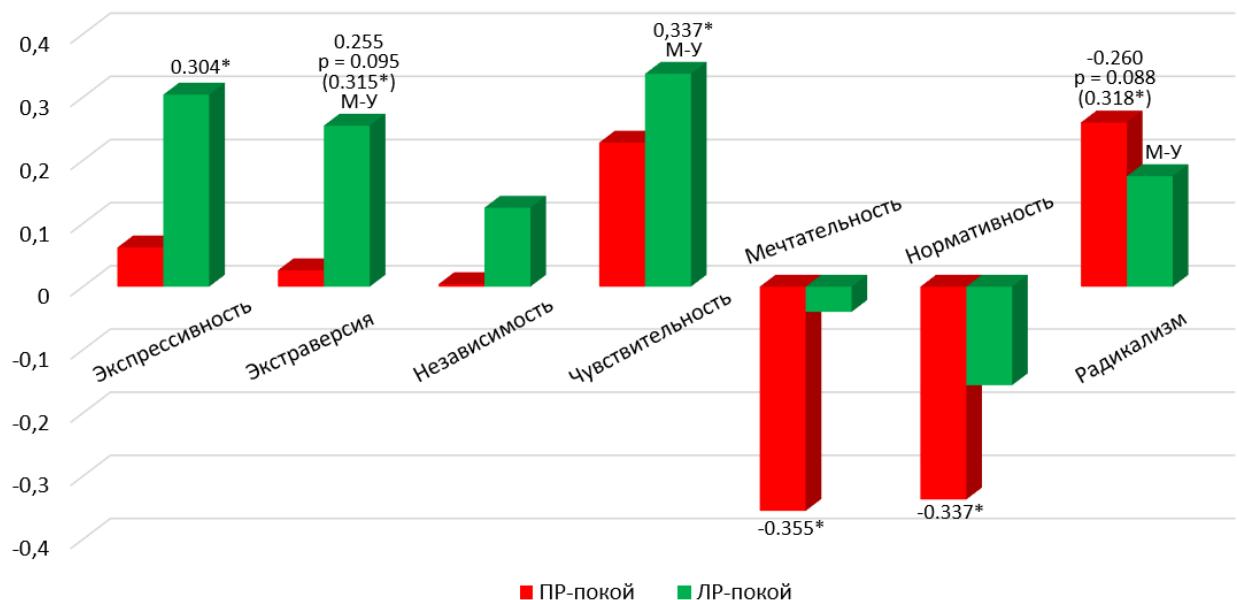


Рисунок 1. Непараметрические (по Спирману) коэффициенты корреляции между личностными характеристиками и точностью классификации сигналов мозга при воображении движений правой (ПР-покой, зеленые столбики) и левой руки (ЛР-покой, красные столбики) по сравнению с покоем. Значимые корреляции ($p < 0.05$) отмечены звездочкой (*), p -значение и коэффициенты корреляции по Пирсону (в скобках) указаны при наличии тенденции по

Спирману. М-У - наличие значимости различий между подгруппами с высоким и низким значением этого фактора по критерию Манна-Уитни.

1.4. Различия между точностью классификации сигналов мозга при воображении движений ПР или ЛР в зависимости от личностных характеристик с учетом скрытой леворукости

1.4.1. Средняя точность классификации сигналов мозга при работе с ИМК

Средняя по условиям ПР-покой, ЛР-покой и ПР-ЛР ТК для “чистых” правшей составляет $66 \pm 8.2\%$, а для скрытых леворуких - $65 \pm 8.5\%$. Внутри группы “чистых” правшей ПР-покой значимо выше, чем ПР-ЛР, внутри группы скрытых леворуких значимых различий между точностями классификации не выявлено. Между группами “чистых” правшей и скрытых леворуких значимых различий как для ПР-покой, так и для ЛР-покой и ПР-ЛР также не выявлено. Минимальная ТК в группе “чистых правшей” составила 49.5%, что не превышает уровень случайного гадания (1 случай из 54), а максимальная - 90%; в группе скрытых леворуких - минимальная 52.1% и максимальная 89.1%.

1.4.2. Корреляционный анализ

Результаты анализа (рисунок 2) показывают, что только у “чистых” правшей, но не у скрытых леворуких экспрессивность (F), экстраверсия (F2), самоутверждение (E) значимо положительно коррелируют с ТК ПР-покой, высокая нормативность (G) - с ТК ПР-покой и ЛР-покой. Напротив, только у скрытых леворуких, но не у “чистых” правшей фактор чувствительность (I) значимо положительно коррелирует с ТК ПР-покой.

Корреляции с ТК таких факторов, как мечтательность (M) и радикализм (Q1) не зависят от скрытой леворукости.

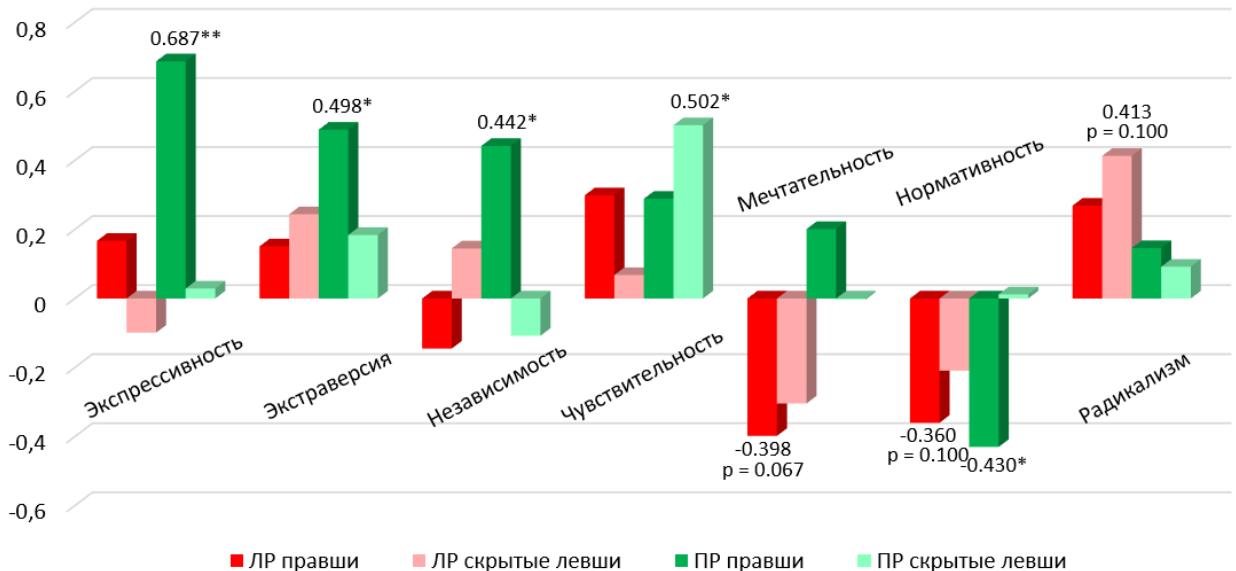


Рисунок 2. Непараметрические (по Спирману) коэффициенты корреляции между личностными характеристиками и точностью классификации сигналов мозга при воображении движений правой (ПР-покой, зеленые столбики) и левой руки (ЛР-покой, красные столбики) по сравнению с покоем у «чистых» праворуких и у «скрытых» леворуких. Значимые корреляции ($p < 0.05$) отмечены звездочкой (*) или двумя звездочками (***) ($p < 0.01$), p -значение указано при наличии тенденции.

В этом исследовании выявлена связь точности классификации сигналов мозга с личностными характеристиками, причем эта взаимосвязь может меняться в зависимости от скрытого левшества. Личностные характеристики, оптимальные для управления ИМК, отличаются в зависимости от того, воображается движение ведущей или неведущей руки. Предполагается, что полученные данные связаны с особенностями обработки информации и организации движений в правом и левом полушарии правшей и левшей, в частности с разным содержанием дофамина в разных полушариях.

Известно, что у людей с ведущей ПР доминирует левая нигростриарная дофаминергическая система, а у левшей - правая (Mohr et al., 2003). Вместе с тем есть сведения, о преимущественном содержании дофамина в базальных ганглиях (в бледном шаре, хвостатом ядре и склерупе) левого полушария, по

сравнению с правым (Glick et al., 1982; Van Dyck et al., 2002). Экстравертам свойственна большая дофаминергическая активность, чем интровертам (Wacker, 2017). В нигростриарной дофаминергической системе дофамин играет роль стимулирующего нейромедиатора, способствующего повышению двигательной активности, уменьшению двигательной заторможенности и скованности, снижению гипертонуса мышц. Такая роль дофамина будет, по всей вероятности, приводить и к растормаживанию нейронных пулов, связанных с регуляцией движений и их воображением. Бледный шар регулирует сложные двигательные акты, при его раздражении наблюдается сокращение мышц конечностей. Хвостатое ядро играет важную роль в сознательном контроле двигательной активности, а скорлупа отвечает за регуляцию движений и влияет на различные виды обучения. Здесь напомним, что уровень базальных ганглий – это уровень синергий и штампов по Н.А.Бернштейну (Bernstein, 1990; Latash, 2020; Profeta, Turvey, 2018), а движения, которые наши испытуемые воображали в ходе эксперимента (поднимание и опускание руки) – это хорошо выученные, стереотипные движения, которые вполне можно отнести к категории «штампов». Следовательно, можно предположить, что точность классификации сигналов мозга при воображении нашими испытуемыми движений именно ПР, но не ЛР была больше у экстравертов в связи с большей активностью их дофаминергической системы по сравнению с интровертами.

2. Исследование механизмов воображения движений при обучении управлению ИМК, основанному на воображении движений верхних и нижних конечностей.

2.1. Точность классификации

Точность классификации, усредненная по всем 10 сессиям, ни у одного из испытуемых и в среднем по испытуемым значимо не отличается в зависимости от того, какое движение воображается - кистей, стоп или локомоция. Для воображения движений кистей средняя по всем участникам эксперимента точность классификации составила $50.5 \pm 7.9\%$ ($m \pm SD$) (минимальное

значение – 41.7%, что выше уровня случайного гадания (33%), максимальное значение – 69.3%), стоп – $49 \pm 7.4\%$ (минимальное значение – 40.8, максимальное значение – 64.6%), локомоции – $49.4 \pm 6.8\%$ (минимальное значение – 47.4%, максимальное значение – 62.2%).

Успешность воображения движений в среднем по всем испытуемым в первый день выше при воображении локомоции, чем стоп, во второй день – кистей, чем локомоции, и в пятый день – стоп, чем кистей.

На протяжении периода обучения точность классификации при воображении движений кистей и стоп значимо меняется, при воображении локомоции – наблюдается лишь тенденция (рис.3). По сравнению с 1-м днем обучения на 3-й день значимо увеличивается точность классификации при воображении движений как кистей, так и стоп. Затем точность классификации для кистей значимо уменьшается от 3-го к 5-му дню и вновь увеличивается к 8-му дню (рис. 3 А). Колебания величины точности классификации для стоп не так очевидны, однако в 4-й и 10-й день она значимо меньше, чем в 5-й и 7-й день, а в 6-й – чем в 7-й (рис. 3 Б).

Оценка динамики изменения точности классификации с помощью линейной аппроксимации зависимости точности классификации от дня обучения выявила значимость ($p<0.05$) у 6 из 10 испытуемых: у испытуемого №1 – положительные тренды для кистей и локомоции, №2 и №3 – положительный тренд для стоп, №4 – отрицательные тренды для кистей и локомоции, №5 – отрицательный тренд для стоп, №6 – отрицательный тренд для локомоции (рис. 4). У четырех участников, как и в среднем по выборке, значимых изменений не выявлено.

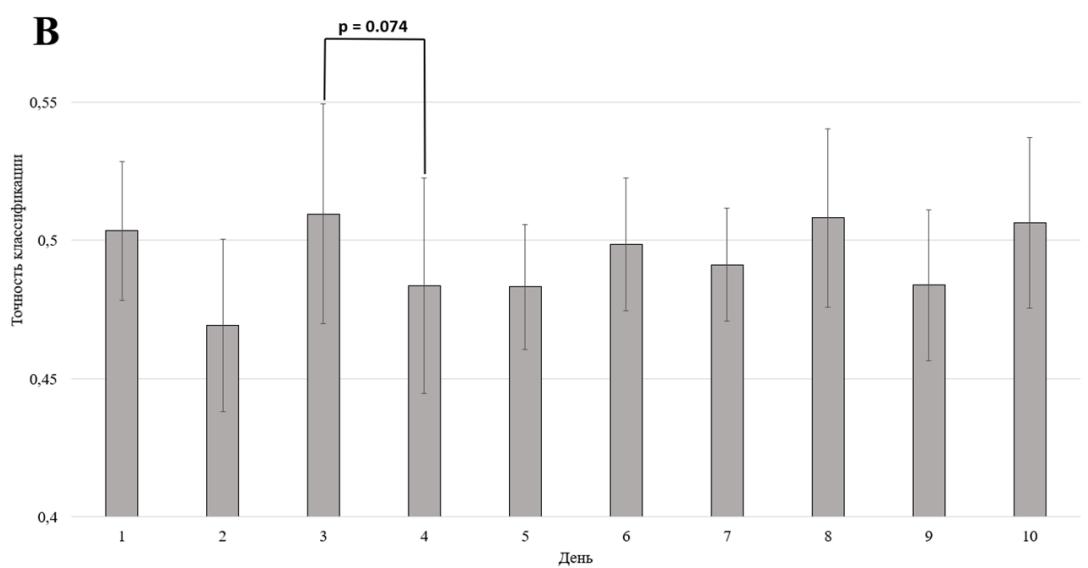
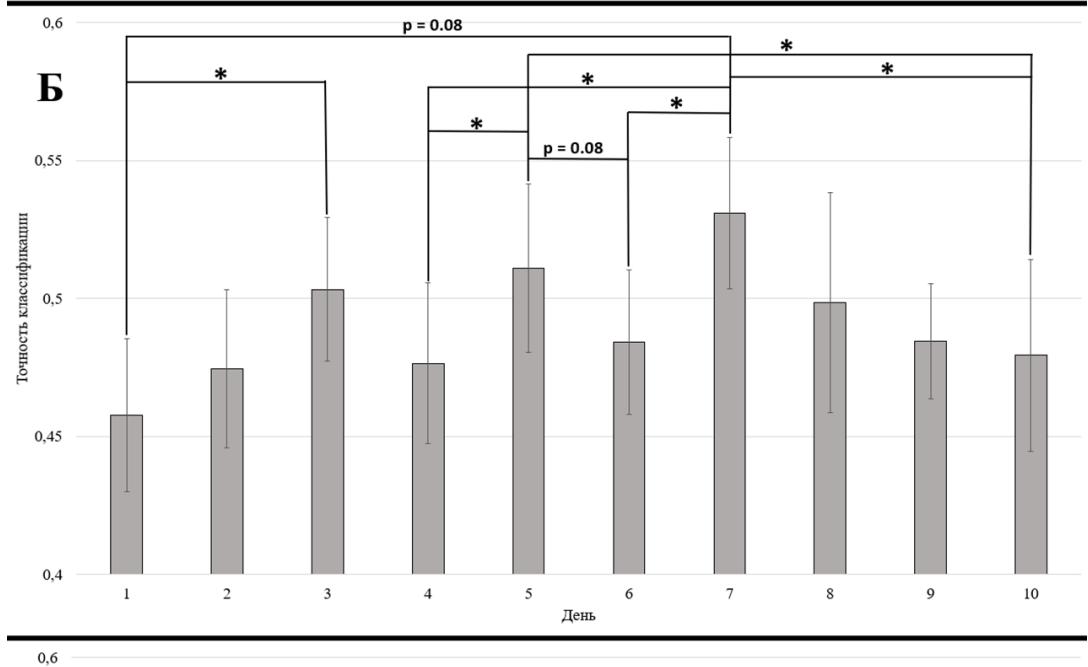
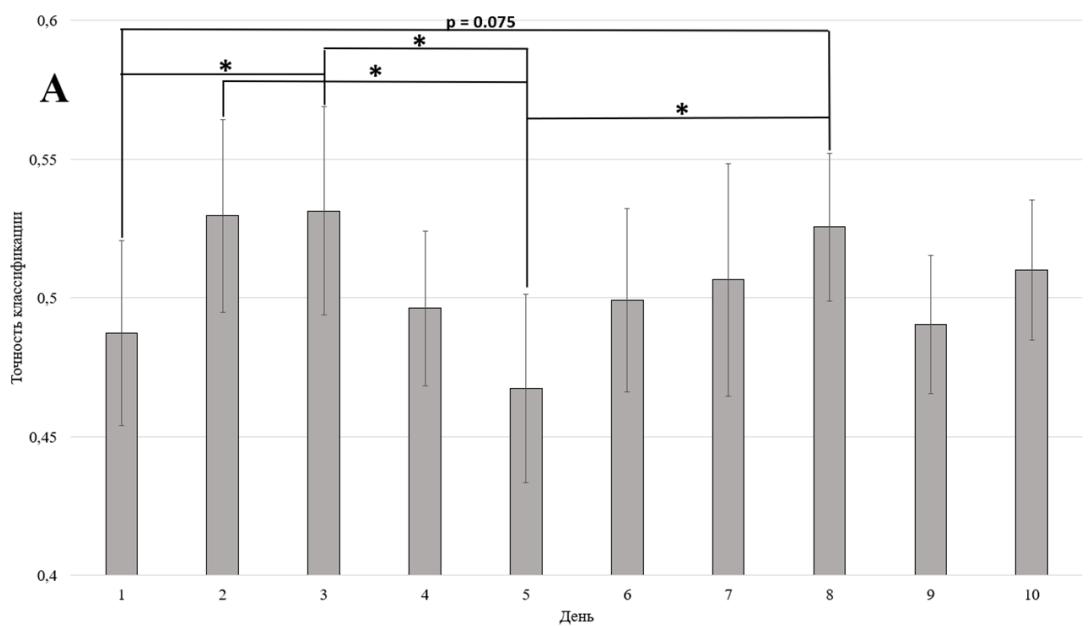


Рисунок 3. Точность классификации состояний мозга при воображении движений кистей (А), стоп (Б) и локомоции (В), усредненная по всем 10 испытуемым. Значимые отличия в точности классификации ($p < 0.05$) отмечены звездочкой (*), в случае тенденции указана вероятность.

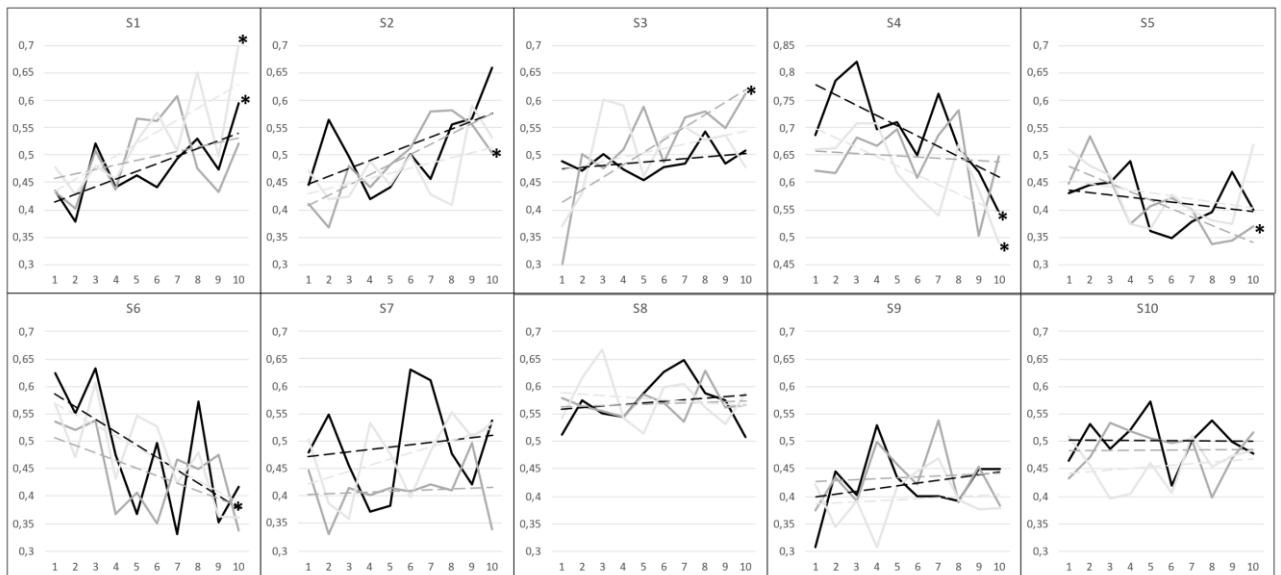


Рисунок4. Индивидуальные кривые обучения для 10 испытуемых (S1–S10). По оси абсцисс: день обучения, по оси ординат: точность классификации состояний мозга. Сплошные линии — кривые обучения, пунктирные линии — тренды. Чёрные линии — кривые обучения и тренды при воображении движений кистей, темно-серые — стоп, светло-серые — локомоции. Значимые ($p < 0.05$) тренды отмечены звездочкой (*).

Выявленные отличия между активностью мозга в зависимости от типа воображаемых движений связаны, по-видимому, с различиями в активности мозга при воображении этих разных движений. В отличие от воображаемых в наших экспериментах сравнительно простых движений кистей (раскрытие кисти) и стоп (тыльное сгибание в голеностопном суставе), локомоция представляет собой высоко-координированный двигательный навык, реализация и воображение которого обеспечивается активацией большого количества структур мозга (LaFougère et al., 2009). Кроме того, можно

предположить, что в реальной жизни люди гораздо чаще представляют себе локомоцию(например, когда у них возникает намерение куда-то пойти), чем воображают движения в отдельных суставах, в особенности тыльное сгибание стопы.

Динамика изменений точности классификации сигналов мозга при воображении движений разных типов по-видимому связаны с различиями в динамике изменения программ организации этих движений при обучении их воображению.

Согласно имеющимся в литературе данным, при обучении как реальным, так и воображаемым движениям происходит переход от кортико-мозжечковой к кортико-стриарной сети (Lafleur et al., 2002; Lacourse et al., 2005; Floyer-Lea and Matthews, 2004). Представляется вероятным, что этот переход отражается в изменении точности классификации ЭЭГ-сигналов при обучении воображению движений в нашем эксперименте, причем эти изменения могут происходить по-разному в зависимости от того, какие нейронные сети задействованы в этом процессе – связанные с воображением кистей, стоп или локомоции.

Полученные данные могут, по-видимому, быть сопоставлены с результатами, описанными в одном из последних обзоров, посвященных двигательному обучению, в котором показано, что в зависимости от типа обучения задействуются разные области мозга (Krakauer et al., 2019).

Сложный характер кривых обучения, полученных в нашем исследовании, – с увеличением и снижением точности классификации соответствует упомянутым Бернштейном соображениям о многоступенчатом характере обучения (Бернштейн, 1996).

Индивидуальный характер успешности/неуспешности обучения, выявленный в наших экспериментах, соответствует имеющимся в литературе данным о т.н. «ИМК-неграмотности» (BCIilliteracy), т.е. неспособности около 10-30% людей работать с ИМК(Jeunetetal., 2015; Guillot, RienzoandCollet, 2014).

Показано, что личностные характеристики определяют успешность управления ИМК (Jeunetetal., 2015; Боброва и др., 2020, Решетникова и др., 2021; Bobrovaetal., 2020; Bobrovaetal., 2021).

Данные о динамике обучения воображению движений также свидетельствуют об индивидуальном характере этого процесса(Corsietal., 2019; Qiuetal., 2018; Irimiaetal., 2018; Buchetal., 2008).

2.2. Анализ связей точности классификации с личностными характеристиками.

Анализ корреляционных связей ТК и ЛХ выявил значимые связи, отличающиеся в зависимости от дня обучения и от типа воображаемого движения - кистей, стоп или локомоции(табл. 1). ЛХ, выявившие значимые связи с ТК, были сгруппированы в 7 основных групп.

	1 сессия	2 сессия	3 сессия	4 сессия	5 сессия
К и с т и	К +Высокий интеллект** +Мечтательность -Нонконформизм БП -Теплота**	БП +Доверчивость	БП -Привязанность** -Теплота** -Сотрудничество -Уважение других** +Напряженность	A +Нейротизм К +Общительность +Высокая тревожность БП -Ответственность +Эмоц. неустойчивость +Напряженность	БП -Доминирование -Привлечение внимания +Предусмотрительность -Экспрессивность -Любопытство** -Любознательность -Артистичность** -Пластичность
С т о п ы	A +Экстраверсия К +Смелость БП -Сотрудничество** +Напряженность	A +Нейротизм К -Нонконформизм +Высокая тревожность БП -Ответственность** +Эмоц. неустойчивость +Напряженность	БП -Привязанность -Теплота** -Сотрудничество** -Уважение других** +Предусмотрительность +Напряженность -Артистичность	БП +Самоконтроль поведения -Экспрессивность -Любопытство** -Любознательность -Артистичность** -Пластичность	БП -Доминирование -Общительность -Понимание +Самоконтроль поведения +Предусмотрительность -Любопытство -Любознательность -Артистичность**
Л о к о м о ц и я	A +Экстраверсия БП -Сотрудничество** +Напряженность	A +Экстраверсия К -Нонконформизм БП -Теплота -Сотрудничество -Ответственность** +Напряженность	БП -Привязанность** -Теплота -Сотрудничество +Напряженность	БП -Привязанность** -Теплота -Понимание** -Уважение других +Предусмотрительность	БП -Привязанность -Теплота -Сотрудничество** -Уважение других**

	6 сессия	7 сессия	8 сессия	9 сессия	10 сессия
К и с т и	K +Высокий интеллект БП +Доверчивость -Тревожность	K +Экспрессивность БП +Доверчивость -Любопытство -Любознательность -Артистичность	БП -Привязанность -Теплота** -Уважение других +Предусмотрительность	БП -Понимание +Предусмотрительность -Артистичность -Любознательность	K -Высокая тревожность БП -Понимание -Эмоц. неустойчивость -Тревожность -Эмоц. лабильность -Экспрессивность -Любопытство -Любознательность
С т о п ы	БП -Понимание -Экспрессивность -Любопытство** -Любознательность** -Артистичность**	БП -Артистичность -Любознательность -Любопытство -Экспрессивность -Доминирование -Общительность -Привлечение внимания -Понимание +Самоконтроль +Аккуратность +Самоконтроль поведения	БП -Привязанность -Понимание -Уважение других -Любознательность	K -Тревожность	K -Эмоц. стабильность БП +Активность -Доминирование -Общительность -Привязанность -Понимание +Самоконтроль поведения +Предусмотрительность -Любопытство -Артистичность
Л о к о м о ц и я	C-X +Ситуативная тревожность K -Эмоц. стабильность -Подозрительность** БП -Привязанность +Напряженность	K +Экспрессивность -Подозрительность БП +Активность -Артистичность	БП -Привязанность -Сотрудничество -Уважение других -Тревожность	БП -Понимание -Тревожность -Любознательность	K +Смелость -Мечтательность

Таблица 1.Связь личностных характеристик и успешности воображения движений в процессе 10 дней обучения. В таблице приведены личностные характеристики, значимо ($p < 0.05$; $p < 0.01 (**)$) коррелирующие с точностью классификации сигналов мозга при воображении соответствующих движений в разные дни эксперимента. К – личностные характеристики из опросника Кеттелла, А – Айзенка, БП – «большой пятерки», С-Х – Спилбергера-Ханина. Серым цветом выделены личностные характеристики, относящиеся к группе 1 (низкая демонстративность), голубым – к группе 2 (индивидуализм), красным – к группе 3 (напряженность и тревожность), фиолетовым – к группе 4 (предусмотрительность и самоконтроль), зеленым – к группе 5 (экстраверсия и активность), коричнево-зеленым – к группе 6 (доверчивость), желтым – к группе 7 (склонность к логическому мышлению).

Группа 1. Низкая демонстративность. К этой группе отнесены следующие факторы, отрицательно коррелирующие с ТК: любознательность, артистичность, любопытство, экспрессивность БП, доминирование, общительность БП, привлечение внимания. Корреляции при воображении движений стоп выявлены значимо чаще, чем кистей и локомоции, для кистей чаще, чем для локомоции. Для стоп больше всего значимых корреляций факторов этой группы с ТК в 4-7 и в 10 сессии, для кистей в 5 сессии.

Группа 2. Индивидуализм (замкнутость, отстраненность, эмоциональная холодность). К этой группе отнесены следующие факторы, отрицательно коррелирующие с ТК: привязанность, сотрудничество, теплота, уважение других, понимание, ответственность, пластичность. Для кистей и стоп больше этих признаков в 3 и 8 дни обучения (что соответствует дням с увеличенной ТК), для локомоции более равномерно.

Группа 3. Напряженность и тревожность. К этой группе отнесены следующие факторы, как положительно, так и отрицательно коррелирующие с ТК (знак коэффициента корреляции указан в скобках): напряженность (+), тревожность (+), высокая тревожность (+), нейротизм (+), эмоциональная

неустойчивость (+), эмоциональная стабильность (-), эмоциональная лабильность (-), ситуативная тревожность (+). Первые 4 дня эксперимента ТК выше у напряженных субъектов, в последние 3 дня – у более спокойных.

Группа 4. Предусмотрительность и самоконтроль. К этой группе отнесены следующие факторы, положительно коррелирующие с ТК: предусмотрительность, самоконтроль поведения, самоконтроль, аккуратность. Корреляции при воображении движений стоп выявлены значимо чаще, чем локомоции и кистей.

Группа 5. Экстраверсия и активность. К этой группе отнесены следующие факторы, положительно коррелирующие с ТК: экстраверсия, экспрессивность К, смелость, активность, общительность.

Группа 6. Доверчивость. К этой группе отнесены следующие факторы, как положительно, так и отрицательно коррелирующие с ТК: доверчивость (+), нонконформизм (-), подозрительность (-).

Группа 7. Склонность к логическому мышлению. К этой группе отнесены следующие факторы: высокий интеллект, мечтательность, т.е. склонность к абстрагированию в противовес конкретности, abstractedness. Корреляции с точностью классификации с разным знаком: при воображении движений кистей эти корреляции положительные, а локомоции - отрицательная.

Результаты показывают, что для каждого экспериментального дня и типа воображаемого движения характерен свой набор ЛХ, являющихся предикторами успешности воображения соответствующего движения. Иначе говоря, предикторы успешности управления ИМК изменяются в процессе обучения, эти изменения зависят от того, какое движение воображается.

Динамика изменений ЛХ, оптимальных для управления ИМК, имеет свою специфику для воображения движений разных типов, однако есть и общие основные тенденции: 1) лучшие показатели ТК у более напряженных людей в первые дни обучения и у более спокойных – в конце обучения; 2)

оптимальность управления ИМК при воображении кистей и, в особенности стоп (но не локомоции) людьми с низкой демонстративностью в середине 10-дневного периода обучения; 3) важность индивидуализма для успешности воображения локомоции практически во всем периоде обучения.

Полученные результаты об изменении успешности управления ИМК в зависимости от факторов напряженности и тревожности соответствуют данным о том, что тревожность ухудшает обучение движениям (Spornetal., 2020). В наших экспериментах в первые дни обучения различимость сигналов мозга при воображении движений всех типов была больше у волонтеров с высокой напряженностью, при воображении движений стоп также с высокой тревожностью и эмоциональной неустойчивостью, однако в последние дни обучения более успешны в воображении движений были более спокойные люди. Можно предположить, задача обучения воображению движений, как и задача обучения реальным движениям сложнее для людей с высокой тревожностью, что отражается в меньшей разделимости сигналов мозга при анализе ЭЭГ для управления ИМК у таких людей на последнем этапе обучения. Сведений о важности низкой демонстративности поведения для обучения как реальным, так и воображаемым движениям кистей и стоп, а также индивидуализма для обучения локомоции, нами в литературе не обнаружено.

Данные свидетельствуют о различиях в оптимальной длительности тренировок управления ИМК в зависимости от индивидуальных особенностей и могут быть использованы при разработке индивидуально-ориентированных программ реабилитации движений.

2.3. Анализ спектральной мощности.

Был проведен анализ спектральной мощности сигналов ЭЭГ в покое и при воображении движений правой и левой кисти в диапазонах 8-13 Гц (альфа), 13-21 Гц (бета-1), 21-35 Гц (бета-2) (рис. 5).

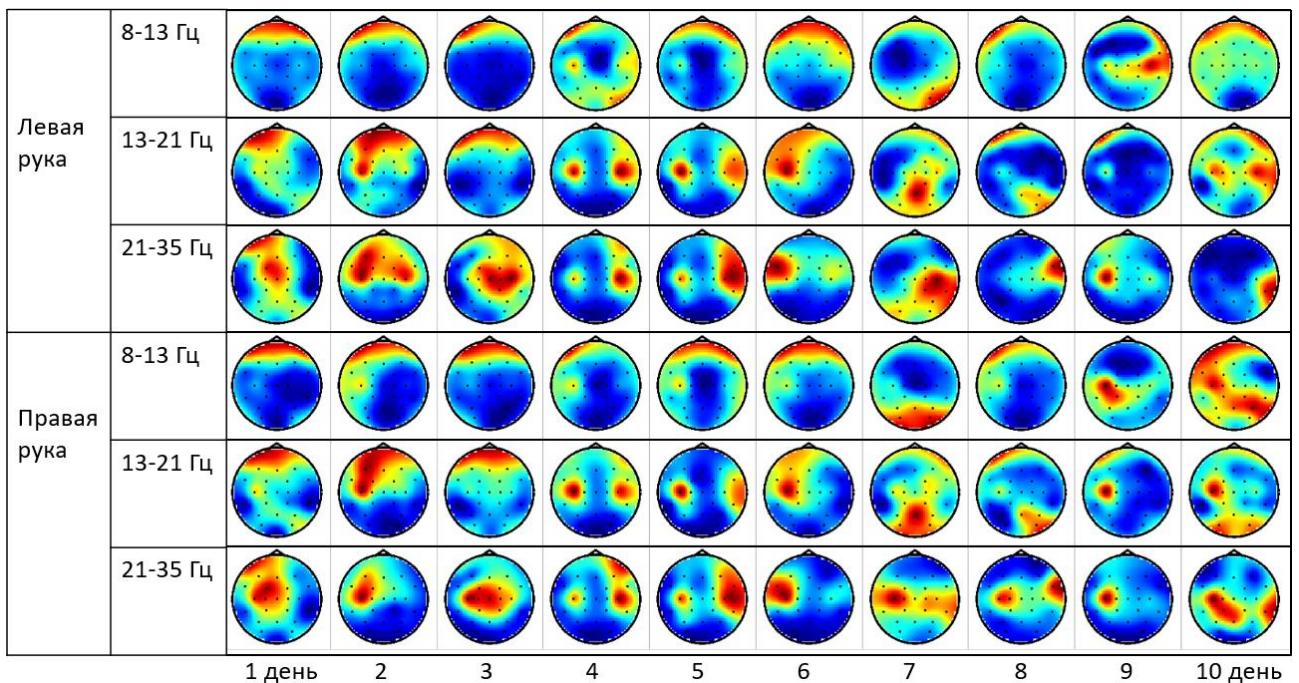


Рисунок5. Топоплоты средней для всех испытуемых депрессии ритмов (отношение покой/левая рука и покой/правая рука) при воображении движений левой руки (3 верхних ряда) и правой руки (3 нижних ряда) на протяжении 10 дней (столбцы). Красные области – депрессия ритмов максимальна, синие – минимальна.

В диапазоне 21-35 Гц депрессия ритма в первые три дня максимальна в центральных областях при воображении обеих рук, что соответствует данным McFarlandet. al., 2000. На 3-й день, когда наблюдается первый значимый максимум точности классификации, данный центральный очаг депрессии смещается контраполатерально воображаемой руке (и правой, и левой). На 4-й день депрессия ритма максимальна над проекциями кисти, в большей степени в правом полушарии для обеих рук. На 5-й день картина сохраняется, но смещается более контраполатерально, аналогично ритму 13-21 Гц. На 6-й день, также аналогично ритму 13-21 Гц, очаг остается только в левом полушарии для обеих рук. На 7-й день при воображении ЛР наблюдается депрессия ритма в темени справа, ПР – аналогично, но менее выраженно, а также в проекции кисти контраполатерально. В 8-10-й дни вновь наблюдается активность в левом полушарии для обеих рук. На 9-й день депрессия ритма максимальна четко над

отведениями, контралатеральными воображаемой руке, а на 10-й день добавляются очаги в латеральных областях правого полушария – существенная депрессия при воображении ЛР и минимальная депрессия – при воображении ПР.

В диапазоне 13-21 Гц депрессия ритма в первые три дня максимальна в лобных областях и больше выражена в левом полушарии, что соответствует расположению зоны Брука и зеркальных нейронов. На 2-й день наблюдается выраженный очаг в области проекции правой кисти в левом полушарии при воображении движений обеих кистей, который на следующий день исчезает. На 3-й день, когда отмечается первый значимый максимум точности классификации, очаг депрессии обнаруживается только в лобных областях. На 4-й день депрессия ритма максимальна четко расположена над проекциями кистей, в большей степени контралатерально воображаемой руке. На 5-й день картина размывается, а на 6-й день очаг остается только в левом полушарии для обеих рук. На 7-й день депрессия наблюдается центрально в теменной области для обеих рук, что соответствует данным McFarlandetal., 2000, а к 8-10-му дню она вновь появляется в левом полушарии для обеих рук. При этом на 9-й день депрессия ритма максимальна четко над отведениями, контралатеральными воображаемой руке, а на 10-й день добавляются очаги в латеральных областях правого полушария – существенная депрессия при воображении ЛР и минимальная депрессия – при воображении ПР.

В диапазоне 8-13 Гц депрессия ритма в начале обучения максимальна в лобных областях, а начиная со 2-го дня обучения больше выражена в левом полушарии, что соответствует расположению зоны Брука и зеркальных нейронов. На 2-й день при воображении ПР в левом полушарии в области отведения C4 (проекция правой кисти) возникает очаг депрессии ритма, который к 9-му и 10-му дню достигает максимума. При воображении ЛР тот же очаг депрессии ритма возникает на 4-й день также в левом полушарии, а в правом полушарии он выражен слабее. На 3-й день, когда наблюдается первый

значимый максимум точности классификации, очаг депрессии в лобных областях слева сужается для ЛР, для ПР он более симметричен. К 8-му дню, когда наблюдается второй значимый максимум точности классификации, в области этого очага и фронтальнее депрессия минимизируется, и становится максимальной в нижнетеменных областях. На 9-й день депрессия ритма максимальна четко над отведениями, контралатеральными воображаемой руке, на 10-й день при воображении ПР этот очаг сохраняется и дополняется депрессией в лобных областях, а также ипсилатеральным очагом в нижнетеменной области. При воображении ЛР депрессия отмечается только в лобных отведениях. В этот день различия между активностью мозга при воображении ПР и ЛР максимальны.

Таким образом, в ходе обучения воображению движений наблюдается сложный ансамбль взаимодействия ритмов в разных областях мозга. В первые три дня преобладает активность в лобных областях левого полушария, к 3-му дню достигается максимум точности классификации. На 4-й день обучения падает точность классификации, резко меняется распределение десинхронизации при воображении движений кисти, она становится выражена над областями проекции кисти. В последующие дни эта картина размывается, наблюдается десинхронизация в более каудальных областях. Очаги десинхронизации контралатерально воображаемой руке в диапазоне 8-13 Гц наблюдаются только к 9-му дню обучения, в бета-диапазоне – на 3-5 дни. Данные, по-видимому, отражают изменение программ движения при обучении воображению движений.

3. Исследование механизмов воображения движений при управлении ИМК в условиях ЧЭССМ и пассивного перемещения стопы.

3.1. Особенности ЭМГ.

В результате экспертной оценки ЭМГ были выявлены следующие ее особенности:

1. При воображении движений без дополнительных воздействий (зрительной обратной связи, БиоКина или ЧЭССМ) ЭМГ слабо выражена (рис. 6);

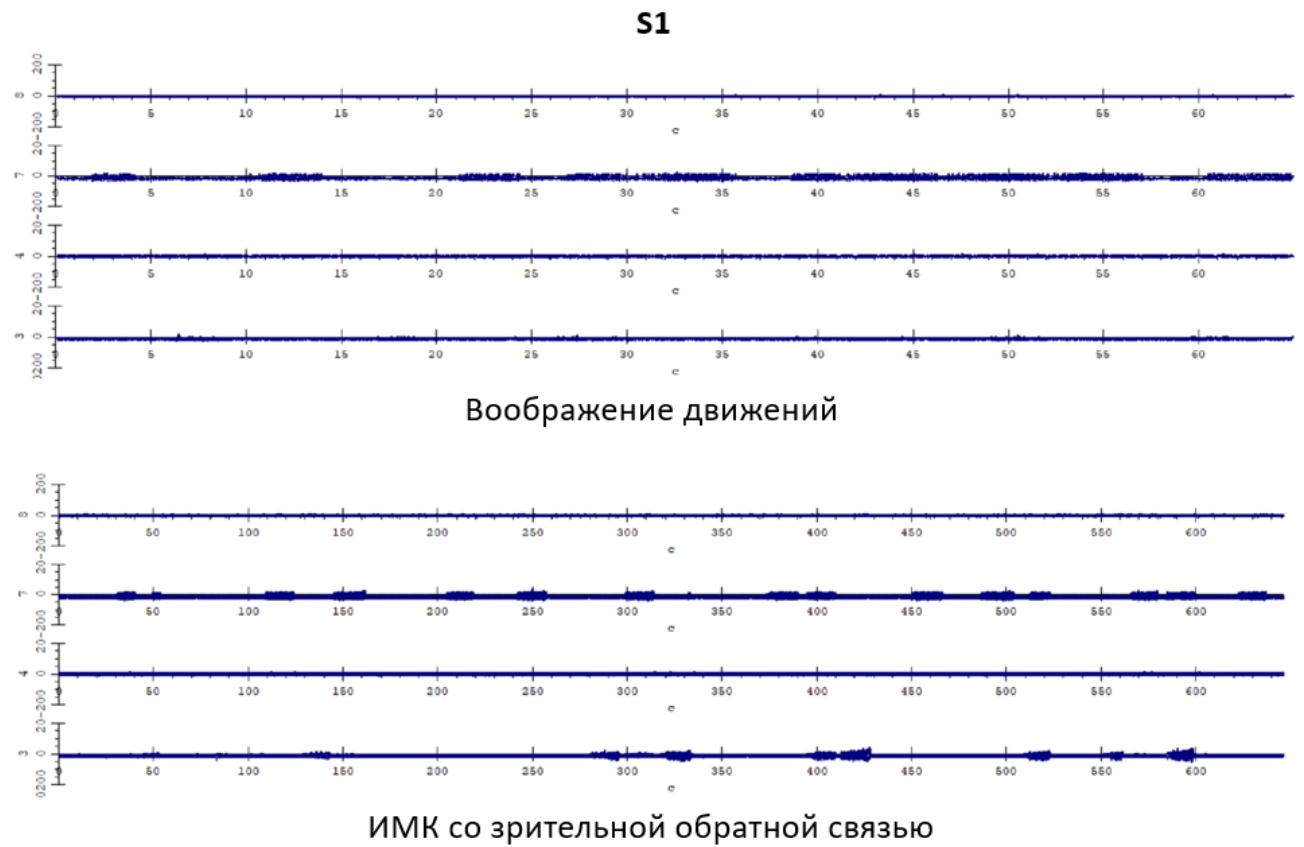
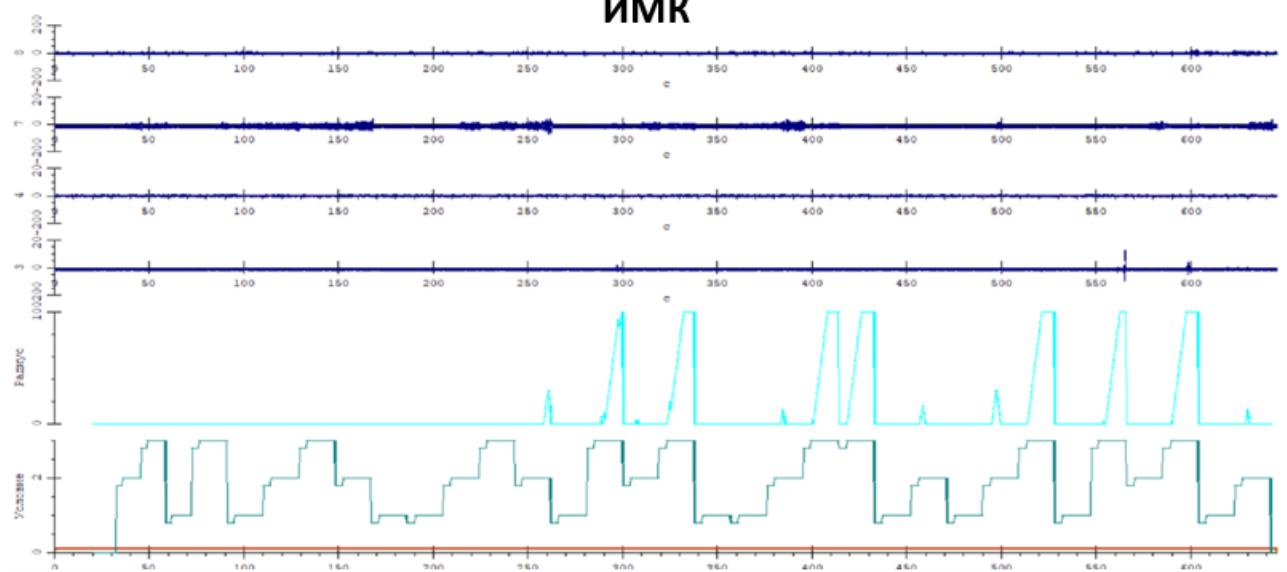


Рисунок 6. Электромиограмма испытуемого S1 при воображении движений (сверху) и при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью (снизу). По оси абсцисс – время в секундах (с), по оси ординат – электрический потенциал в микровольтах. 3ий канал – электромиограмма мышцы Gastrocnemiusлевой ноги, 4ый канал – TibialisAnteriorлевой ноги, 7ой канал – Gastrocnemiusправой ноги, 8ой канал – TibialisAnteriorправой ноги.

2. ЭМГ при воображении движений может быть больше выражена при ЧЭССМ (рис. 7);

S2

ИМК



ИМК+ЧЭССМ

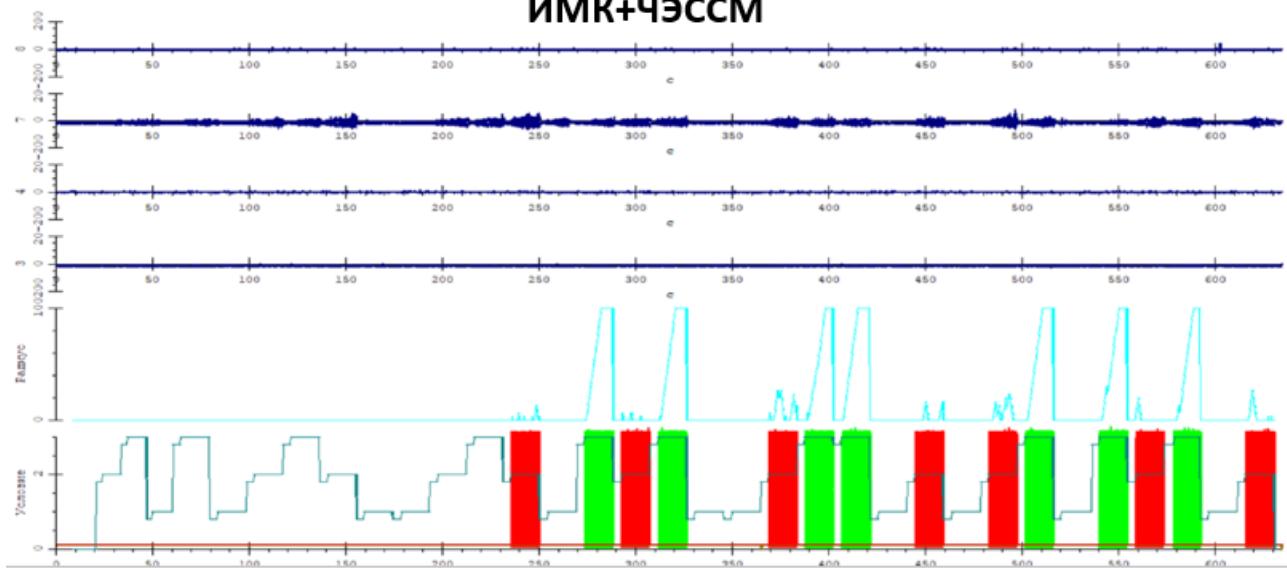


Рисунок 7. Электромиограмма испытуемого S2 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью (сверху) и при управлении ИМК со зрительной обратной связью и ЧЭССМ. Голубая линия отражает точность классификации (успешность воображения движения). Зеленые колонки демонстрируют тип инструкции – находиться в состоянии покоя (низкие колонки), воображать движение левой стопы (средней высоты колонки), воображать движение правой стопы (высокие колонки). Столбцы отражают тип сигнала электрической стимуляции: зеленые столбцы – стимуляция экстензорных пуллов правой ноги, красные – левой.

3. ЭМГ при воображении движений может быть больше выражена при использовании механотерапии (БиоКин) (рис. 8);

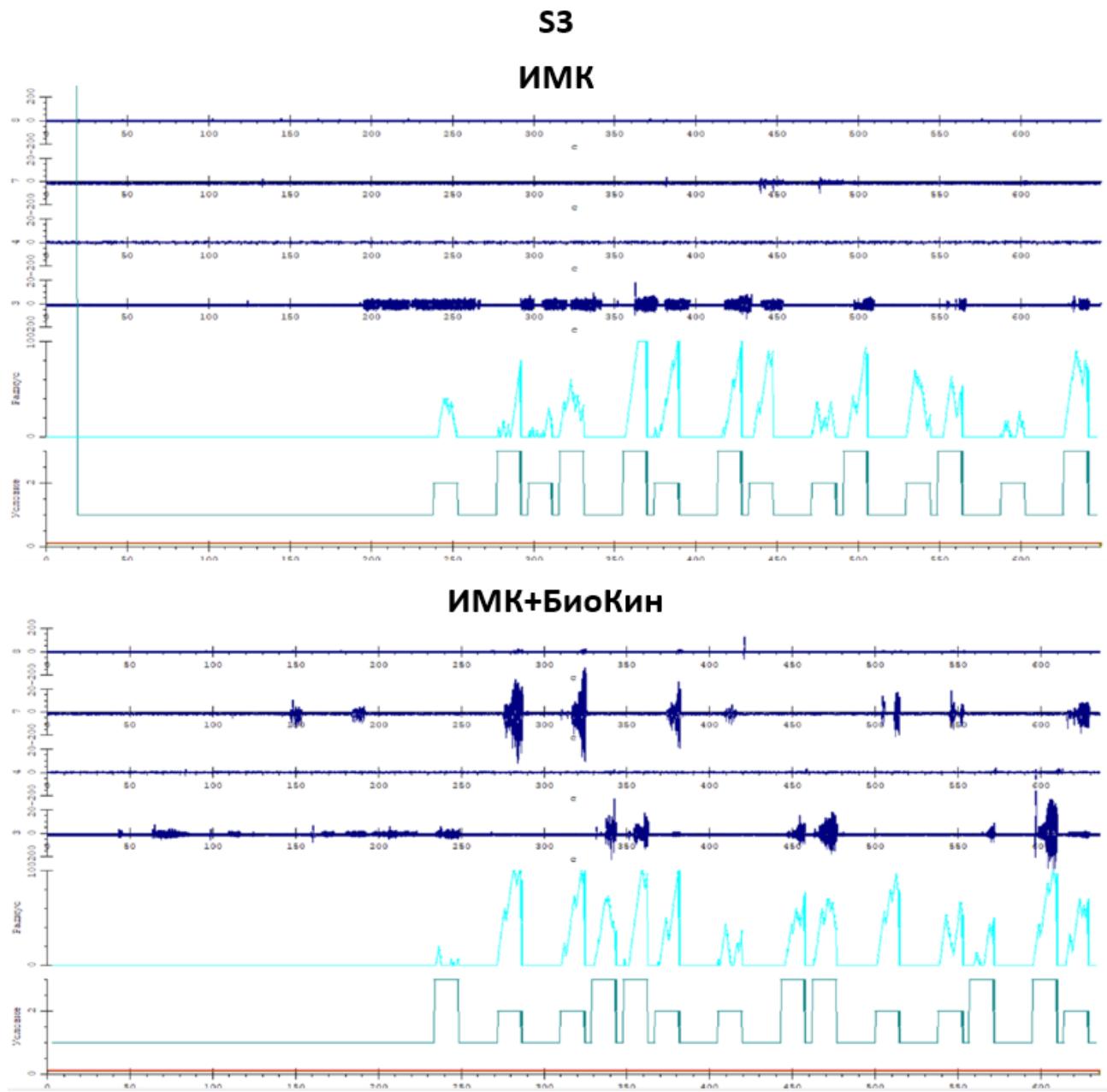


Рисунок 8. Электромиограмма испытуемого S3 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью (сверху) и при управлении ИМК со зрительной обратной связью и механотерапией (БиоКин) (снизу).

4. ЭМГ может наблюдаться при воображении движений противоположной стопы (не той, воображение которой диктуется инструкцией) (рис. 9);

S3
ИМК

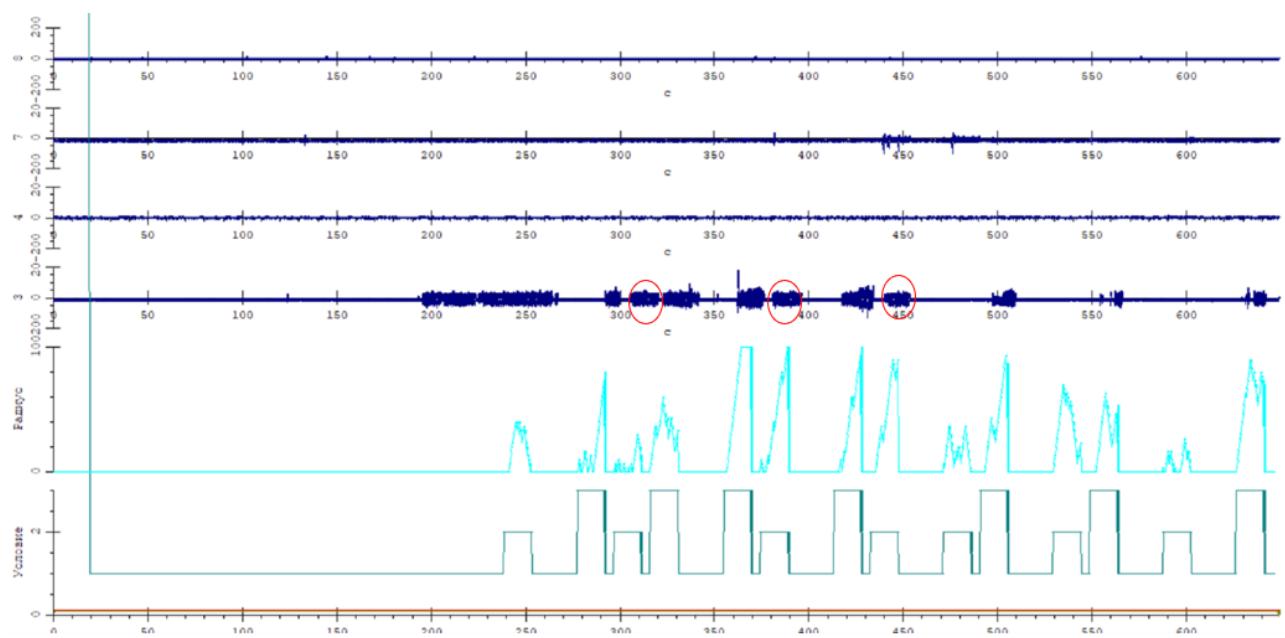


Рисунок 9. Электромиограмма испытуемого S3 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью. Красными кругами обозначены пачки импульсов, появляющиеся на мышце правой ноги, в то время как испытуемый воображал движение левой ноги.

5. Пачки ЭМГ активности во время воображения движений могут быть растянуты во времени (рис. 10);

S4
ИМК+ЧЭССМ

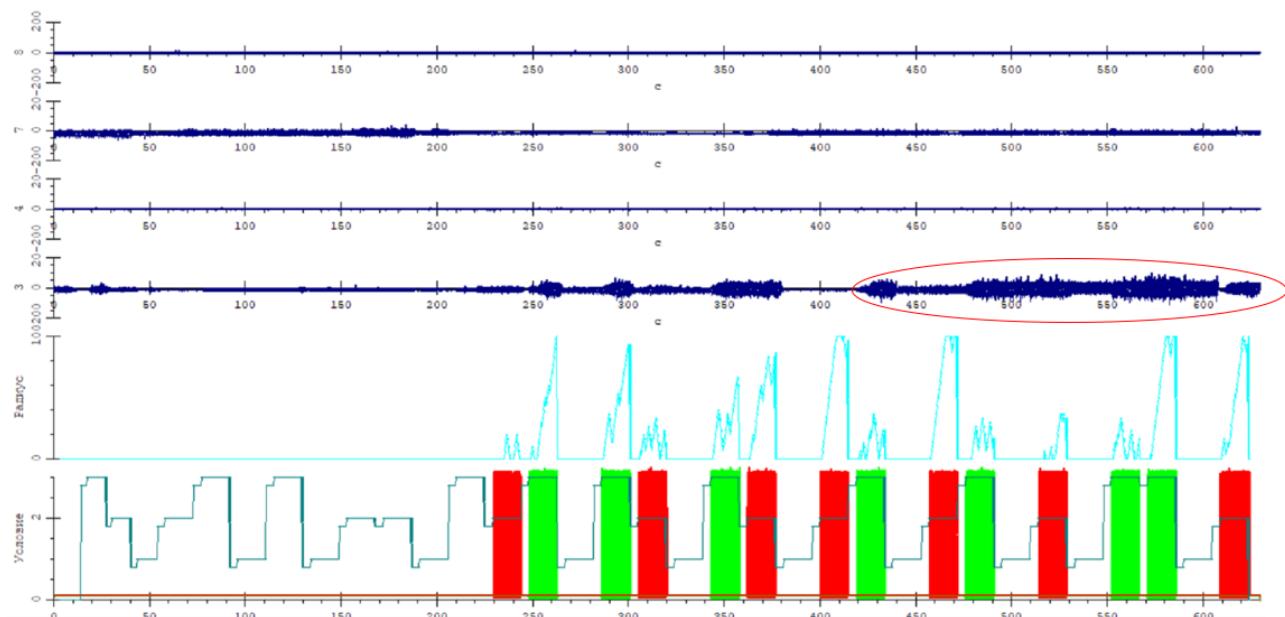


Рисунок 10. Электромиограмма испытуемого S4 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью и ЧЭССМ. Красным овалом обозначены растянутая во времени пачка ЭМГ активности.

6. При попытках воображения движений мышцы могут находиться почти в постоянном напряжении (рис. 11);

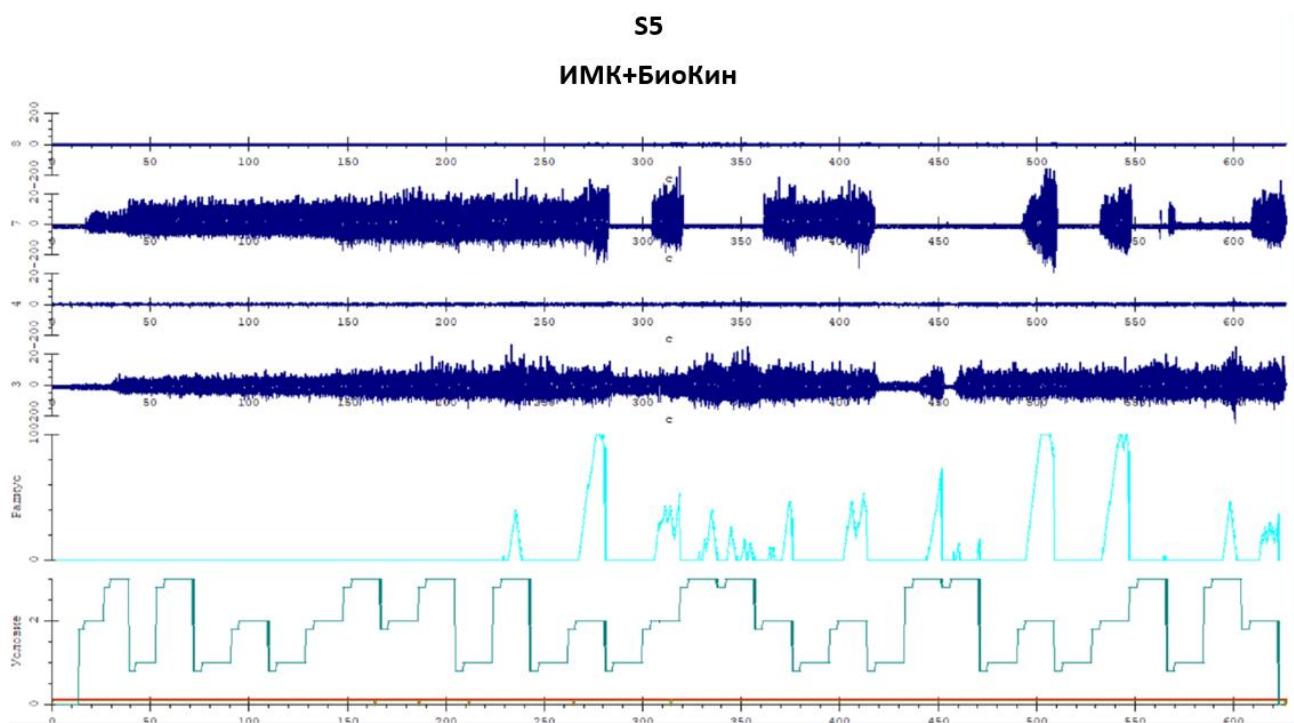


Рисунок 11. Электромиограмма испытуемого S5 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью и механотерапией (БиоКин).

7. ЭМГ при воображении движений может наблюдаться только при наличии зрительной обратной связи (во время тестирующей выборки классификатора, а не обучающей) (рис. 12);

ИМК

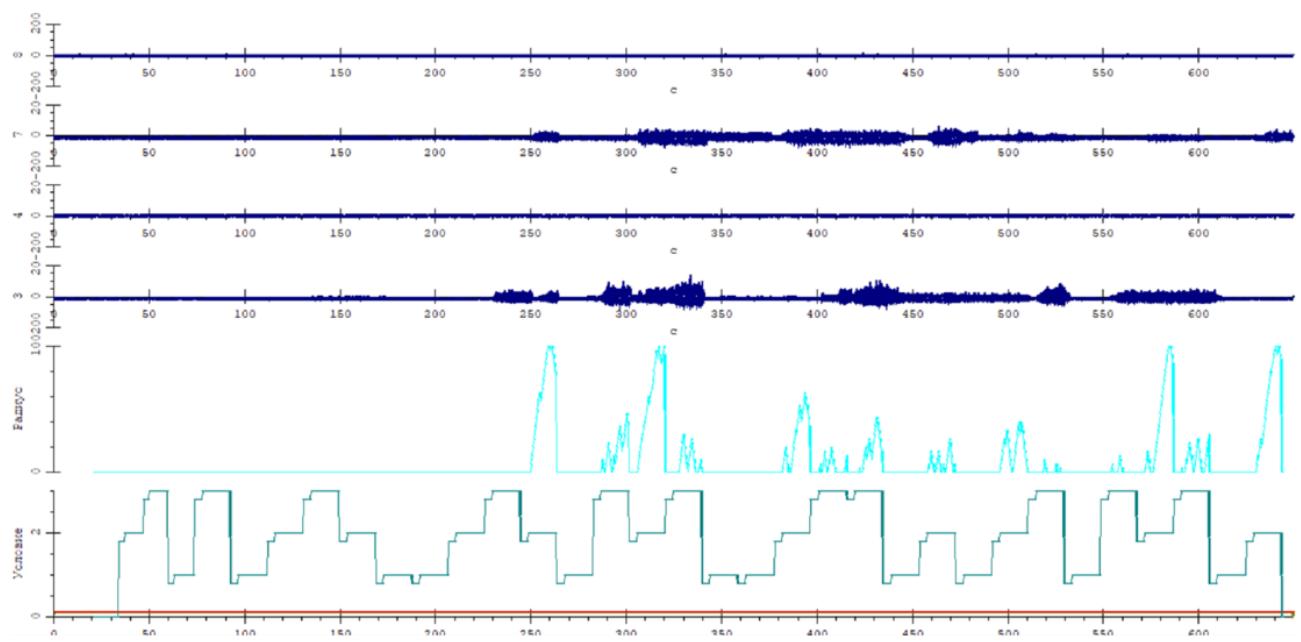


Рисунок 12. Электромиограмма испытуемого S6 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью.

8. Относительная активность мышц при воображении движений минимальна при отсутствии ЧЭССМ и механотерапии (БиоКин) (рис. 13, 14);

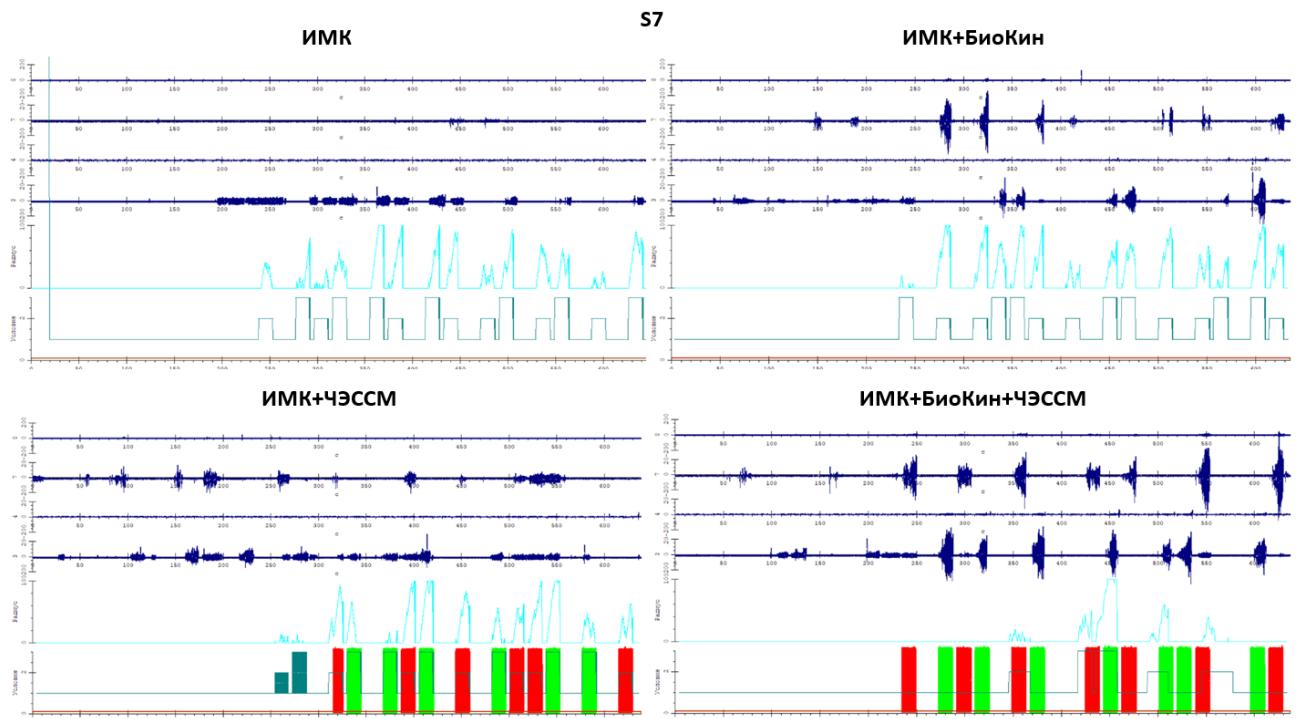


Рисунок 13. Электромиограмма испытуемого S7 при управлении ИМК, основанном на воображении движений, со зрительной обратной связью (сверху слева); со зрительной обратной связью и механотерапией (БиоКин) (сверху справа); со зрительной обратной связью и ЧЭССМ (внизу слева); со зрительной обратной связью, механотерапией (БиоКин) и ЧЭССМ (внизу справа).

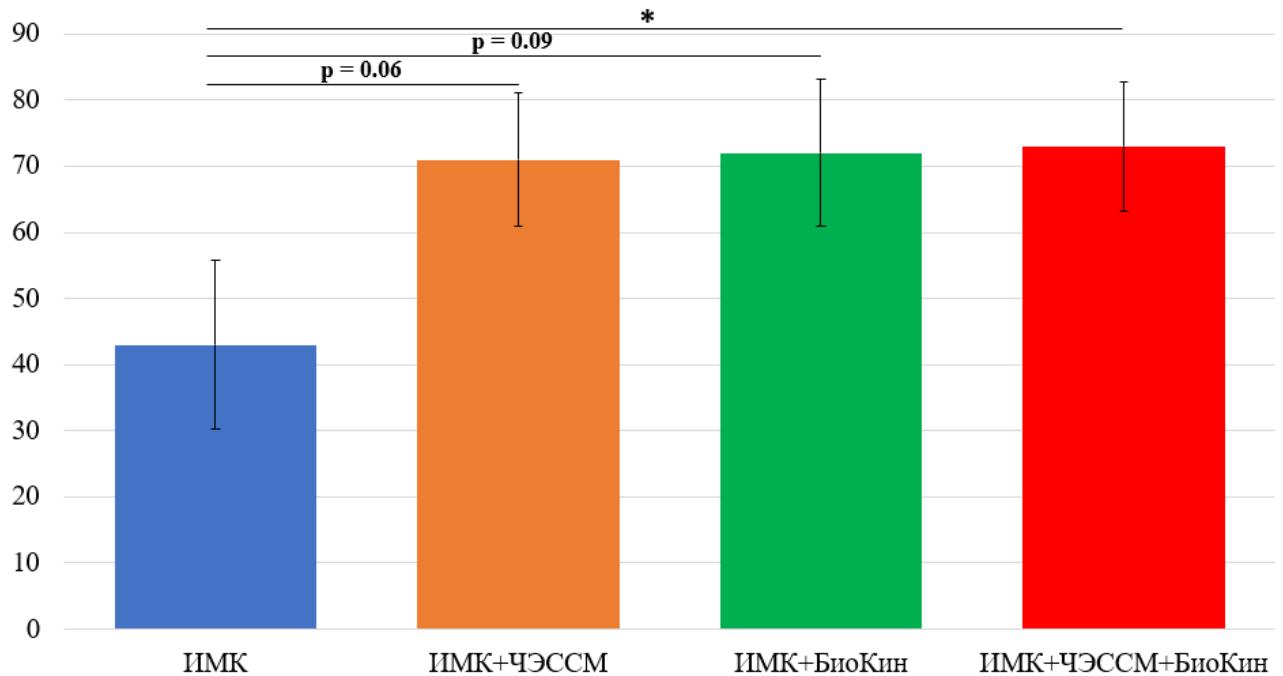


Рисунок 14. Средняя относительная активность мышц (в процентах) при разных условиях. Значимые различия между условиями обозначены звездочкой (*) ($p < 0.05$).

9. Синхронизация ЭМГ с инструкцией (насколько миографическая активность совпадает с подаваемой командой) минимальна при отсутствии ЧЭССМ и механотерапии (БиоКин) (рис. 15).

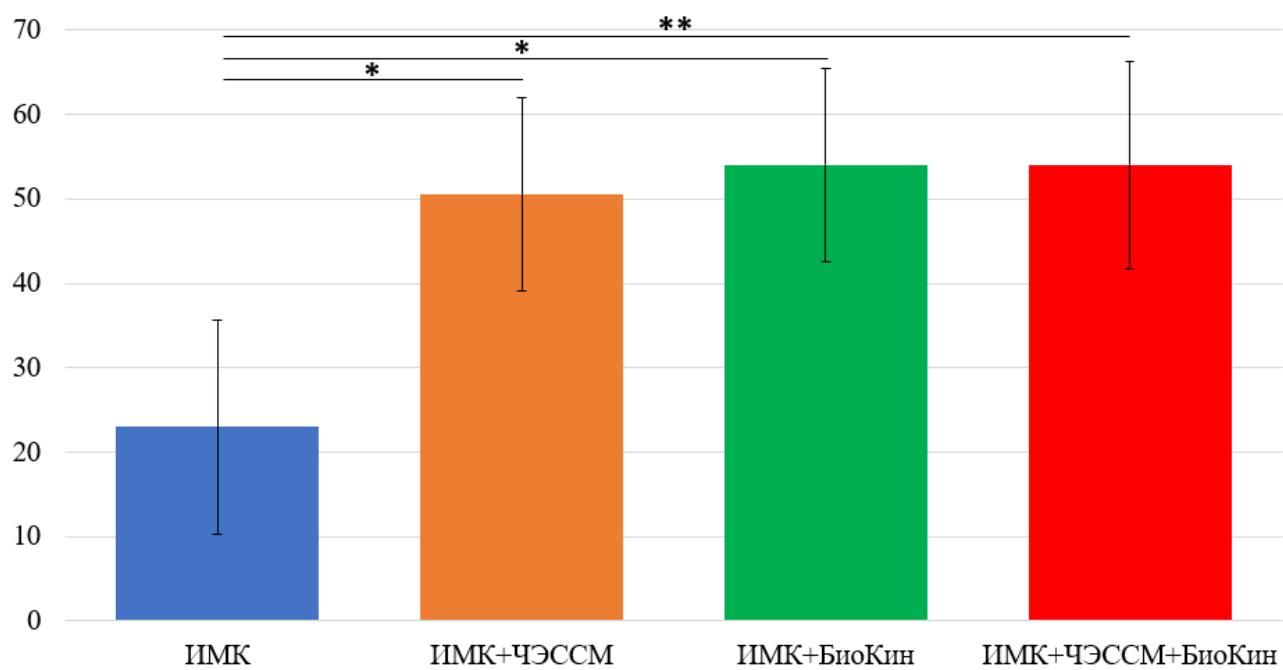


Рисунок 15. Средняя степень синхронизации ЭМГ с инструкцией (в процентах). Значимые отличия обозначены звездочками ($p < 0.05$ (*)) и $p < 0.01$ (**)).

3.2. Точность классификации сигналов мозга при воображении движений.

Средняя точность классификации при отсутствии ЧЭССМ и механотерапии (БиоКин) меньше, чем при использовании механотерапии или ее совмещения с ЧЭССМ (рис. 16 А). Точность распознавания состояния покоя не зависит от условий (рис. 16 Б). Точность распознавания состояния при воображении движений левой стопы при совместном воздействии ЧЭССМ и механотерапии значительно выше, чем при одиночном использовании ИМК и чем при применении ИМК с ЧЭССМ (рис. 16 В). Точность распознавания состояния при воображении движений правой стопы при совместном воздействии ЧЭССМ и механотерапии значительно ниже, чем при использовании ИМК с механотерапией (рис. 16 Г).

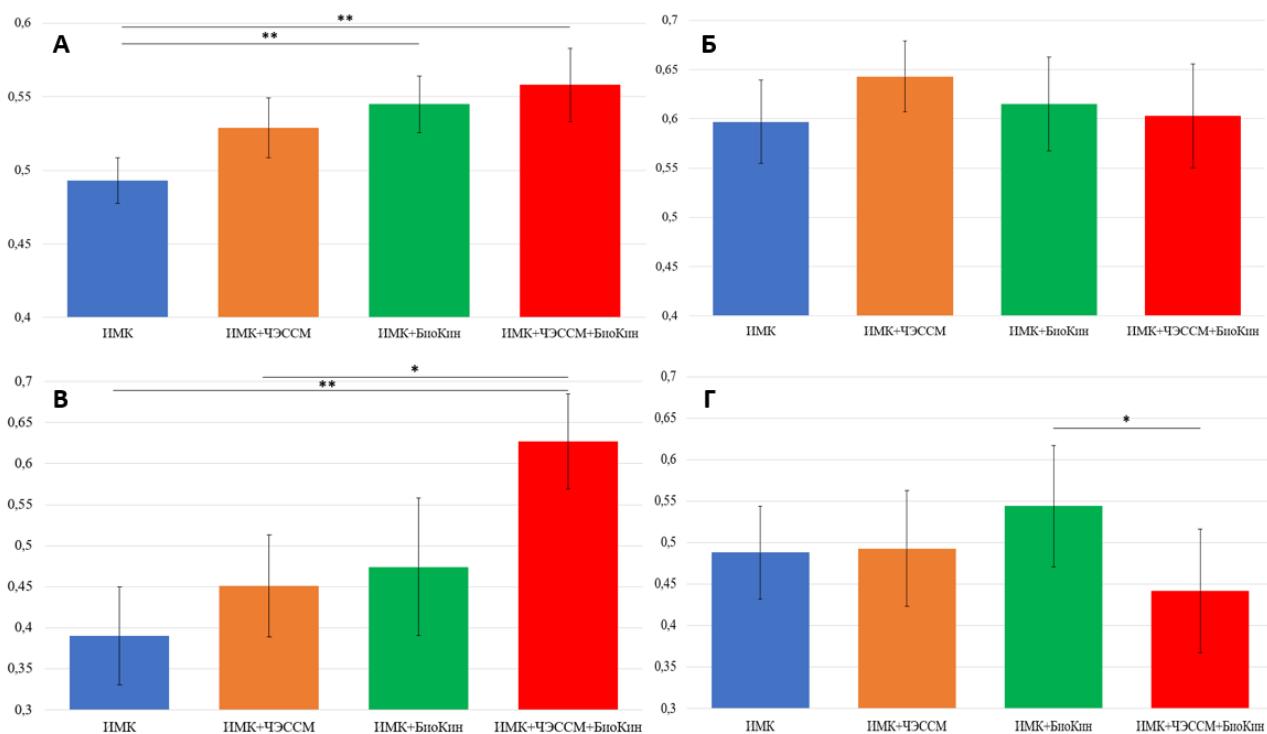


Рисунок 16. Точность классификации сигналов мозга при управлении ИМК при разных условиях. А - средняя точность классификации сигналов мозга; Б - точность распознавания сигналов мозга состояния покоя; В - точность распознавания сигналов мозга при воображении движений левой стопы; Г - точность распознавания сигналов мозга при воображении движений правой стопы. Значимые отличия обозначены звездочками ($p < 0.05 (*)$, $p < 0.01 (**)$).

Данный феномен, вероятно, можно объяснить межполушарной асимметрией: левое полушарие правшей специализируется на контроле баллистического аспекта движений (относительно независимы от сигналов обратной связи), а правое полушарие – позиционного (зависят от сигналов обратной связи)(Goble et al., 2009; Haaland et al., 2004; Przybyla et al., 2012; Mutha et al., 2013; Mani et al., 2013; Mutha et al., 2011; Bobrova et al., 2015, 2017). Большая роль обратных связей при организации движений правым полушарием, по-видимому, является причиной увеличения точности классификации при воображении движений левой, а не правой стопы при совместной стимуляции ЧЭССМ и механотерапии. Данные свидетельствуют о межполушарных различиях во влиянии афферентного восходящего потока на

активность центральных отделов системы регуляции движений при их воображении.

Заключение

Исследование воображения движений верхних конечностей при однократном управлении ИМК обнаружило влияние межполушарной асимметрии: для успешности воображения поднятия правой руки оказываются важны одни личностные характеристики, для левой – другие; фактор скрытой леворукости оказывает влияние на то, какие личностные характеристики важны для успешного воображения правой или левой руки. Предполагается, что данный феномен связан с различиями активности дофаминергических нейронных систем в правом и левом полушарии.

Анализ особенностей воображения движений верхних и нижних конечностей показал отсутствие значимых различий точности классификации при представлении движений рук, ног и локомоции, в среднем по всем сессиям, что предполагает возможность использования воображения нижних конечностей в нейрореабилитации, основанной на применении ИМК. При этом было показано, что в определенные дни обучения существует значимая разница в точности классификации при воображении движений кистей, стоп и локомоции. Что касается динамики обучения управлению ИМК, значимых изменений в точности классификации от первого дня к последнему не выявлено ни для одного типа воображаемых движений. В то же время у отдельных испытуемых наблюдались значимые изменения (как положительные, так и отрицательные) в успешности воображения кистей, стоп или локомоции. Кроме того, для каждого дня обучения управлению ИМК был выявлен свой набор личностных характеристик, которые обеспечивают наилучшее воображение движений каждого типа движений.

Была разработана и протестирована на здоровых испытуемых система, направленная на нейрореабилитацию нижних конечностей, основанная на применении ЧЭССМ и механотерапии, запускаемых от сигналов ИМК, основанного на воображении движений.

Выводы

1. При воображении движений благодаря активации афферентных входов нижележащих уровней системы регуляции движения при помощи механотерапии и ЧЭССМ увеличивается активность мышц нижних конечностей и нейронных сетей головного мозга, обеспечивающих воображение движений этих мышц. Увеличение активности этих сетей асимметрично, и происходит только при воображении движений левой, но не правой стопы, что свидетельствует о межполушарных различиях механизмов кодирования не только реальных, но и воображаемых движений.
2. Личностные характеристики, оптимальные для воображения движений при управлении ИМК, различны при воображении движений конечностей правой или левой стороны, от индекса скрытого левшества, от типа воображаемого движения: раскрытие кисти, тыльное сгибание стопы или локомоция личностные и от обучения.
3. Изменения точности классификации и спектральной мощности сигналов мозга при воображении движений в ходе обучения дают основания предполагать изменение программы формирования воображаемого движения при обучении.
4. Таким образом, выявлены факторы, влияющие на функционирование системы, обеспечивающей воображение движений, и на оптимизацию управления ИМК: межполушарная асимметрия, активация афферентных входов нижележащих уровней системы регуляции движения, обучение, личностные характеристики, оптимальные для управления ИМК, зависящие от

длительности обучения, от латерализации воображаемой конечности и от типа воображаемого движения.

Список публикаций по теме исследования (в рецензируемых журналах)

1. Боброва Е.В., Фролов А.А., **Решетникова В.В.** Методы и подходы для оптимизации управления системой “интерфейс мозг-компьютер” здоровыми пользователями и пациентами с нарушениями движений //Журнал Высшей Нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2017. – № 67 (4). – С. 377–393.

Переводная версия:

Bobrova E.V., Frolov A.A., **Reshetnikova V.V.** Methods and Approaches to Optimizing Control Using a Brain–Computer Interface System by Healthy Subjects and Patients with Motor Disorders //Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2018. – № 48. – P. 1041–1052.

2. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Волкова К.В., Фролов А.А. Влияние эмоциональной устойчивости на успешность обучения управлению системой “интерфейс мозг-компьютер”//Журнал Высшей Нервной деятельности им. И.П. Павлова. –2017.–№ 67 (4). – С. 485–492.

Переводная версия:

Bobrova, E.V., **Reshetnikova, V.V.**, Volkova, K.V., Frolov A.A. Effects of Emotional Stability on Success in Learning to Control a Brain–Computer Interface//Neuroscience and Behavioral Physiology. – 2018.– № 48. – P. 1114–1119.

3. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Воображение движений нижних конечностей для управления системами «интерфейс мозг-компьютер» //Журнал Высшей Нервной деятельности им. И.П. Павлова.– 2019.– № 69(5). – С.529–540.

Переводная версия:

Bobrova E.V., **Reshetnikova V.V.**, Frolov A.A., Gerasimenko Y.P. Use of Imaginary Lower Limb Movements to Control Brain–Computer Interface

Systems//Neuroscience and Behavioral Physiology. –2020.–№ 50. –P. 585–592.

4. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Межполушарная асимметрия и личностные характеристики пользователя мозг-компьютерного интерфейса при воображении движений рук // Доклады Академии наук. – 2020. – № 495(6). – С. 558–561.

Переводнаяверсия:

Bobrova E.V., **Reshetnikova V.V.**, Vershinina E.A., Grishina A.A., Frolov A.A., Gerasimenko Yu.P. Interhemispheric Asymmetry and Personality Traits of Brain–Computer Interface Users in Hand Movement Imagination // Doklady Biological Sciences.–2020.–№ 495. –P. 265–267.

5. Гришин А.А., Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Герасименко Ю.П.Система детектирования фаз шагательного цикла и стимуляции спинного мозга как инструмент управления локомоцией человека // Медицинская техника. –2020. – № 5(323). – С. 10–13.

Переводнаяверсия:

Grishin A.A., Bobrova E.V., **Reshetnikova V.V.**, Moshonkina T.R., Gerasimenko Yu.P. A System for Detecting Stepping Cycle Phases and Spinal Cord Stimulation as a Tool for Controlling Human Locomotion // Biomedical Engineering. –2021.– № 54(5). –P. 312–316.

6. Bobrova E.V., **Reshetnikova V.V.**, Vershinina E.A., Grishin A.A., Bobrov P.D., Frolov A.A., Gerasimenko Y.P. Success of Hand Movement Imagination Depends on Personality Traits, Brain Asymmetry, and Degree of Handedness // BrainSciences. –2021. – № 11. –P. 853.
7. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Зависимость успешности воображения движенийправой и левой руки от личностных характеристикпользователей//Журнал Высшей Нервной деятельности им. И.П. Павлова. –2021. – № 71 (6). – 830–839.

Дополнительные публикации

1. Боброва Е.В., Богачева И.Н., Волкова К.А., **Решетникова В.В.**, Савинкина А.А., Фролов А.А. Подходы к оптимизации управления системой «Интерфейс мозг-компьютер» здоровыми пользователями и пациентами с нарушениями движений. Четвертая научно-практическая конференция с международным участием «Клиническая нейрофизиология и нейрореабилитация-2016». СПб, 24 - 26 ноября 2016 г.
2. Боброва Е.В., Богачева И.Н., Оганесян В.В., **Решетникова В.В.**, Фролов А.А. Обучение управлению системой «интерфейс мозг-компьютер» пользователями с различным уровнем невротизма. Материалы тринадцатого международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии» и в школе «Новые разработки в психологических, физиологических и медицинских нейроисследованиях». 30 мая -10 июня 2017 г. С. 99-100.
3. **Reshetnikova V.V.**, BobrovaE.V., VolkovaK.V., FrolovA.A. Roleofphsycho-emotionalstatusincontrolofbrain-computerinterface. IEEE 2017. SPCN 2017. Международная конференция «Обработка сигналов изображения и звука в контексте нейротехнологий». 26-30 июня 2017 г., Санкт-Петербург. С. 26-27.
4. Боброва Е.В., Богачева И.Н., Волкова К.В., Гришин А.А., **Решетникова В.В.**, Фролов А.А. Тренинг для обучения управлением системой «интерфейс мозг-компьютер» улучшает воображение движений левой, но не правой руки. Материалы XXIII Юбилейного съезда Физиологического общества им. И. П. Павлова на базе Воронежского государственного медицинского университета им. Н. Н. Бурденко. 18 – 22 сентября 2017г. С. 1052-1056.
5. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Мозг-компьютерные интерфейсы, основанные на воображении движений

нижних конечностей. Конференция «Реабилитация на основе нейротехнологий» (на базе Российского национального исследовательского медицинского университета имени Н.И. Пирогова). Москва, 29 ноября 2018г.

6. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Оганесян В.В., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Механизмы формирования воображаемых движений. Материалы четырнадцатого международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии» и в школе «Новые разработки в психологических, физиологических и медицинских нейроисследованиях». 30 мая -10 июня 2018г. С. 108.
7. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Успешность воображения движений правой, но не левой руки при управлении мозг-компьютерным интерфейсом зависит от уровня нейротизма. Конференция с элементами научной школы, посвященная памяти Е.Е. Никольского, по физиологии мышц и мышечной деятельности «Новые подходы к изучению классических проблем» на базе ГНЦ РФ - ИМБП РАН. 18–20 марта 2019 г. С. 43.
8. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Успешность воображения движений и психо-физиологические характеристики индивидуума. Материалы 15-го международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии». Судак, 30 мая — 10 июня 2019 г. С. 101-102.
9. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Влияние длительного психофизиологического тренинга на уровень концентрации внимания при управлении системой «интерфейс мозг-компьютер». Материалы 15-го международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии». Судак, 30 мая -10 июня 2019 г. С. 350–351.
10. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Интерфейс мозг-компьютер, воображение движений правой и левой руки, межполушарная асимметрия и личностные характеристики пользователя. Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 24–26 сентября 2019 г. С. 40–41.

11. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Связь успешности воображения движений правой и левой руки, тревожности и концентрации внимания при обучении работе с интерфейсом «мозг–компьютер». Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 24–26 сентября 2019 г. С. 210–211.
12. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Возможности использования мозг–компьютерных интерфейсов в реабилитации движений нижних конечностей. II Всероссийская конференция «Реабилитация на основе нейротехнологий». М. РНИМУ, 13 декабря 2019 г.
13. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Гришин А.А., Бобров П.Д., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Мозг–компьютерные интерфейсы, основанные на воображении движений нижних конечностей. III Российский Конгресс "Физическая и реабилитационная медицина" 18-19 декабря 2019 г.
14. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Бобров П.Д., Фролов А.А., Керечанин Я.А., Гришин А.А., Герасименко Ю.П. Мозг–компьютерные интерфейсы, основанные на воображении движений нижних конечностей. VIII Российская конференция с международным участием по управлению движением. Петрозаводск, 20-22 апреля 2020 г. С. 22-23.
15. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А. Зависимость точности классификации сигналов мозга при управлении ИМК и личностных характеристик пользователей от их готовности к выполнению сложных длительных заданий. VIII Российская конференция с международным участием по управлению движением. Петрозаводск, 20-22 апреля 2020 г. С. 22-23.
16. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Бобров П.Д., Фролов А.А., Керечанин Я.А., Гришин А.А., Герасименко Ю.П. Возможности использования в реабилитации мозг–компьютерных интерфейсов, основанных на воображении движений нижних конечностей. Материалы 16-го международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии». Судак, 6-16 октября 2020 г. С. 103.

17. **Reshetnikova V.V.**, Bobrova E.V., Vershinina E.A. The relationship between personal traits and the success of the motor imagery of the right and left hand during the brain-computer interface control. Brain and Mind Symposium. Helsinki, 15-16 October 2020.
18. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Керечанин Я.В., Фролов А.А., Герасименко Ю.П., Гришин А.А. Сопоставление успешности воображения движений верхних и нижних конечностей. Всероссийская конференция с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 9–11 декабря 2020 г. С. 165–166.
19. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Зависимость успешности воображения движений рук при управлении мозг-компьютерным интерфейсом от скрытого левшества. Всероссийская конференция с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 9–11 декабря 2020 г. С. 148.
20. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Герасименко Ю.П. Влияние личностных характеристик и степени рукости на успешность воображения движений верхних конечностей. Материалы 17-го международного междисциплинарного конгресса «Нейронаука для медицины и психологии». Судак, 30 мая — 10 июня 2021 г. С. 317.
21. Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Вершинина Е.А., Исаев М.А., Керечанин Я.А., Гришин А.А., Бобров П.Д., Герасименко Ю.П. Точность классификации сигналов мозга при тренировке воображения движений кистей, стоп и локомоции, и ее связь с личностными характеристиками. Материалы X Всероссийской с международным участием школы-конференции по физиологии мышц и мышечной деятельности. Москва, 28 июня – 01 июля 2021 г. С. 34.
22. **Решетникова В.В.**, Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Бобров П.Д., Исаев М.Р., Гришин А.А., Герасименко Ю.П. Индивидуальные портреты пользователей при обучении управлению мозг-компьютерным интерфейсом, основанным на воображении движений кистей, стоп и локомоции. Всероссийская конференция с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 8–10 декабря 2021 г. С. 74–75.

- 23.Боброва Е.В., **Решетникова В.В.**, Гришин А.А., Бобров П.Д., Исаев М.Р., Герасименко Ю.П.Неинвазивный кортико-спинальный нейроинтерфейс. Всероссийская конференция с международным участием «Интегративная физиология». СПб, 8–10 декабря 2021 г. С. 53–54.
24. **Решетникова В.В.**, Гришин А.А., Бобров П.Д., Исаев М.Р. Анализ мышечной и мозговой активности прииспользовании нейроинтерфейса, сопряженного с механотерапией и неинвазивной электрической стимуляцией спинного мозга.XXVIII Всероссийская конференция молодых учёных с международным участием«Актуальные проблемы биомедицины–2022». СПб, 24–26 марта 2021 г.

Список литературы

Бернштейн Н.А. О ловкости и ее развитии. – М.: Медицина, 1996. –229 с.

Боброва Е.В., Решетникова В.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Межполушарная асимметрия и личностные характеристики пользователя мозг-компьютерного интерфейса при воображении движений рук. ДАН. 2020. 495(1): 558–561.

БоброваЕ.В., РешетниковаВ.В., ФроловА.А., ГерасименкоЮ.П. Воображениедвиженийнижнихконечностейдляуправлениясистемами «интерфейсмозг-компьютер». ЖВНД. 2019. 69(5): 529–540.

Волкова К. В., Дагаев Н. И., Киселев А. С., Касумов В. Р.,Александров М. В., Осадчий А.Е. Интерфейс мозг-компьютер: опыт построения, использования и возможные пути повышения рабочих характеристик. Ж ВНД. 2017. 67(4): 504–521.

Решетникова В.В., Боброва Е.В., Вершинина Е.А., Гришин А.А., Фролов А.А., Герасименко Ю.П. Зависимость успешности воображения движений правой и левой руки от личностных характеристик пользователей. ЖВНД. 2021. 71(6): 830–839.

- Belda-Lois J-M., Mena-del Horno S., Bermejo-Bosch I., Moreno J.C., Pons J.L., Farina D., Iosa M., Molinari M., Tamburella F., Ramos A., Caria A., Solis-Escalante T., Brunner C., Rea M. Rehabilitation of gait after stroke: a review towards a top-down approach. *J. Neuroeng. Rehabil.* 2011. 8: 66.
- Bernstein N.A. *Physiology of Movement and Activity*, 1st ed.; Gasenko O.G.; Nauka: Moscow, Russia, 1990.
- Bobrova E.V., Bogacheva I.N., Lyakhovetskii V.A., Fabinskaja A.A., Fomina E.V. Memorization of sequences of movements of the right and left hand by right- and left-handers. *Hum. Physiol.* 2015. 41: 629–635.
- Bobrova E.V., Bogacheva I.N., Lyakhovetskii V.A., Fabinskaya A.A., Fomina E.V. Memorization of sequences of right and left hand movements in right- and left-handers: Vector coding. *Hum. Physiol.* 2017. 43: 13–21.
- Bobrova E.V., Reshetnikova V.V., Vershinina E.A., Grishin A.A., Bobrov P.D., Frolov A.A., Gerasimenko Y.P. Success of Hand Movement Imagination Depends on Personality Traits, Brain Asymmetry, and Degree of Handedness. *BrainSciences*. 2021. 11: 853.
- Bobrova E.V., Reshetnikova V.V., Vershinina E.A., Grishina A.A., Frolov A.A., Gerasimenko Yu.P. Interhemispheric Asymmetry and Personality Traits of Brain–Computer Interface Users in Hand Movement Imagination. *Doklady Biological Sciences*. 2020. 495: 265–267.
- Bragina N.N., Dobrohotova T.A. *Human functional asymmetries*, 2nd ed.; Makhotin, Yu.V.; Medicine: Moscow, Russia, 1988.
- Buch E., Weber C., Cohen L.G., Braun C., Dimyan M.A., Ard T., Mellinger J., Caria A., Soekadar S., Fourkas A., Birbaumer N. Think to Move: a Neuromagnetic Brain-Computer Interface (BCI) System for Chronic Stroke. 2008. 39: 910–917.

Corsi M.-C., Chavez M., Schwartz D., George N., Hugueville L., Kahn A., Dupont S., Bassett D., Fallani F.D.V. Looking for cortical patterns of successful motor imagery-based BCI learning. 8th Graz Brain-Computer Interface Conference 2019.

Floyer-Lea A., Matthews P. Changing brain networks for visuomotor control with increased movement automaticity. *J. Neurophysiol.* 2004. 92: 2405–2412.

Frolov A.A., Mokienko O., Lyukmanov R., Biryukova E., Kotov S., Turbina L., Nadareyshvily G., Bushkova Y. Post-stroke rehabilitation training with a motor-imagery-based brain-computer interface (BCI)-controlled hand exoskeleton: A randomized controlled multicenter trial. *Front. Neuroscie.* 2017. 11: 400.

Glick S.D., Ross D.A., Hough L.B. Lateral asymmetry of neurotransmitters in human brain. *Brain Res.* 1982. 234(1): 53–63.

Goble D.J., Noble B.C., Brown S.H. Proprioceptive target matching asymmetries in left-handed individuals. *Exp. Brain Res.* 2009. 197: 403.

Guillot A., Rienzo F.D., Collet C. The Neurofunctional Architecture of Motor Imagery. Advanced Brain Neuroimaging Topics in Health and Disease. Eds. Papageorgiou T.D., Christopoulos G.I., Smirnakis S.M. London: IntechOpen, 2014. Chapter 16.

Haaland K.Y., Prestopnik J., Knight R.T., Lee R.R. Hemispheric asymmetries for kinematic and positional aspects of reaching. *Brain.* 2004. 127: 1145.

Irimia D.C., Ortner R., Poboroniuc M.S., Ignat B.E., Guger C. High Classification Accuracy of a Motor Imagery Based Brain-Computer Interface for Stroke Rehabilitation Training. *Front. Robot. AI.* 2018. 5: 130.

Jeunet C., N'Kaoua B., Subramanian S., Hachet M., Lotte F. Predicting Mental Imagery-Based BCI Performance from Personality, Cognitive Profile and Neurophysiological Patterns. *PLOS ONE.* 2015. 10(12): e0143962.

Krakauer J., Hadjiosif A., Xu J., Wong A., Haith A. Motor Learning. *ComprPhysiol.* 2019. 9(2): 613–663.

- la Fougère C., Zwergal A., Rominger A., Förster S., Fesl G., Dieterich M., Brandt T., Strupp M., Bartenstein P., Jahn K. Real versus imagined locomotion: a [18F]-FDG PET-fMRI comparison. *Neuroimage*. 2010. 50(4):1589-98.
- Lacourse M.G., Orr E.L., Cramer S.C., Cohen M. J. Brain activation during execution and motor imagery of novel and skilled sequential hand movements. *Neuroimage*. 2005. 27: 505–519.
- Lafleur M. F., Jackson P.L., Malouin F., Richards C.L., Evans A.C., Doyon J. Motor Learning Produces Parallel Dynamic Functional Changes during the Execution and Imagination of Sequential Foot Movements. *NeuroImage*. 2020. 16(1): 142–157.
- Latash M.L. Bernstein's Construction of Movements. The Original Text and Commentaries. 2020.
- Luria A.R. Traumatic aphasia: Its syndromes, psychology and treatment, 1st ed.; Mouton de Gruyter: the Hague, 1970.
- Mani S., Mutha P.K., Przybyla A. Contralesional motor deficits after unilateral stroke reflect hemisphere-specific control mechanisms. *Brain*. 2013. 136: 1288.14.
- McFarland D.J., Miner L.A., Vaughan T.M., Wolpaw J.R. Mu and beta rhythm topographies during motor imagery and actual movements. *Brain Topogr*. 2000. 12(3): 177–186.
- Mohr, C., Landis, T., Bracha, H. S., Brugger, P. Opposite turning behavior in right-handers and non-right-handers suggests a link between handedness and cerebral dopamine asymmetries. *Behav. Neurosci*. 2003. 117(6): 1448–1452.
- MuthaP.K., HaalandK.Y., Sainburg R.L. Rethinking motor lateralization: specialized but complementary mechanisms for motor control of each arm. *PloS One*. 2013.8(3): e58582.13.
- Mutha P.K., Sainburg R.L., Haaland K.Y. Critical neural substrates for correcting unexpected trajectory errors and learning from them. *Brain*. 2011. 134: 3647.

Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. 1971. 9: 97–113.

Perdikis S., Tonin L., Saeedi S., Schneider C., Millán Jd.R. The Cybathlon BCI race: Successful longitudinal mutual learning with two tetraplegic users. *PLOS Biology*. 2018. 16(5): e2003787.

Prasad G., Herman P., Coyle D., McDonough S., Crosbie J. Applying a brain-computer interface to support motor imagery practice in people with stroke for upper limb recovery: a feasibility study. *J NeuroEngineering Rehabil*. 2010. 7: 60.

Profeta V.L.S., Turvey M.T. Bernstein's levels of movement construction: A contemporary perspective. *Hum Mov Sci*. 2018. 57:111–133.

Przybyla A., Good D.C., Sainburg R.L. Dynamic dominance varies with handedness: reduced interlimb asymmetries in left-handers. *Exp Brain Res*. 2012. 216: 419–431.

Qiu Z., Chen S., Daly I., Jia J., Wang X., Jin J. BCI-Based Strategies on Stroke Rehabilitation with Avatar and FES Feedback. *ArXiv*. 2018. abs/1805.04986.

Stieger J.R., Engel S., Jiang H., Cline C.C., Kreitzer M.J., He B., Mindfulness Improves Brain–Computer Interface Performance by Increasing Control Over Neural Activity in the Alpha Band. *Cerebral Cortex*. 2021. 31(1): 426–438.

Van Dyck C.H., Seibyl J.P., Malison R.T., Laruelle M., Zoghbi S.S., Baldwin R.M., Innis R.B. Age-related decline in dopamine transporters: analysis of striatal subregions, nonlinear effects, and hemispheric asymmetries. *Am. J. Geriatr. Psychiatry*. 2002. 10(1): 36-43.

Wacker J. Effects of positive emotion, extraversion, and dopamine on cognitive stability- flexibility and frontal EEG asymmetry. *Psychophysiology*. 2017. 55(1): e12727.