

Пилотное исследование идеомоторного тренинга в контуре интерфейса мозг—компьютер у пациентов с двигательными нарушениями

С.П. ЛИБУРКИНА¹, А.Н. ВАСИЛЬЕВ¹, А.Я. КАПЛАН¹, Г.Е. ИВАНОВА², А.С. ЧУКАНОВА^{2*}

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Москва, Россия; ²ФГБОУ ВО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия

Цель исследования. Изучение характеристик биоэлектрической активности мозга пациентов с двигательными нарушениями при представлении движения в контуре интерфейса мозг—компьютер (ИМК) для определения оптимальных путей использования идеомоторного тренинга на основе ИМК в медицинской реабилитации. **Материал и методы.** В исследовании приняли участие 26 пациентов с нарушением движений рук в результате ОНМК или травматической болезни спинного мозга, которым было предложено пройти идеомоторную тренировку в контуре ИМК. Проводилась оценка выраженности и локализации десинхронизации ЭЭГ при представлении различных движений руками, а также измерялась эффективность управления в двухкомандном ИМК. **Результаты и заключение.** Было выявлено характерное топографическое распределение десинхронизации ЭЭГ при представлении движений руками. Несмотря на то что выраженность реакций ЭЭГ при представлении движений руками у больных была ниже, чем у здоровых в аналогичном регламенте работы, после нескольких тренировочных сессий (не менее 3) все пациенты смогли достичь высокой результативности работы в двухкомандном ИМК на основе представления движений. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования идеомоторного тренинга в контуре ИМК для нейрореабилитации пациентов с двигательными нарушениями.

Ключевые слова: интерфейс мозг—компьютер, ЭЭГ, инсульт, идеомоторная тренировка, представление движений, реабилитация, десинхронизация, мю-ритм.

Brain—computer interface-based motor imagery training for patients with neurological movement disorders

S.P. LIBURKINA, A.N. VASILYEV, A.YA. KAPLAN, G.E. IVANOVA, A.S. CHUKANOVA

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Objective. To study the electric brain activity during motor imagery task in the brain-computer interface (BCI) in motor-disabled patients to determine the optimal ways for using BCI-based ideomotor training in medical rehabilitation. **Material and methods.** The study included 26 patients with arm motor dysfunction caused by a stroke or a spinal cord injury. They were involved in motor imagery training in the BCI. The power and localization of electroencephalographic (EEG) event-related desynchronization during imagery of different arm movements were measured. The accuracy in the two-command BCI was assessed. **Results and conclusion.** The pattern of imagery-related EEG desynchronization showed the typical localization for such tasks. Despite the fact that the power of EEG reactions during motor imagery in motor-disabled patients was on average lower than in healthy subjects during a similar task, all the patients were able to achieve high accuracy in the two-command BCI system after several (at least three) training sessions. Our results demonstrate the great potential for using BCI-based motor imagery training for neurorehabilitation of patients with motor dysfunctions.

Keywords: brain—computer interface, EEG, stroke, ideomotor training, motor imagery, rehabilitation, event-related desynchronization, mu rhythm.

Инсульт является одной из главнейших причин инвалидизации населения, лишь небольшая доля выживших способны вернуться к полноценной активности. В связи с этим, несмотря на уже имеющийся широкий набор восстановительных методик, в настоящее время продолжается поиск новых подходов для повышения эффективности реабилитационных мероприятий [1]. Одной из современных технологий,

направленных на двигательную реабилитацию пациентов, является идеомоторная тренировка на основе технологии интерфейсов мозг—компьютер (ИМК) [2].

Идеомоторный тренинг на основе кинестетического представления движения уже хорошо зарекомендовал себя в спорте [3] и медицинской реабили-

тации больных с нарушением двигательных функций [4]. Показано, в частности, что в ходе идеомоторного тренинга активируются процессы нейропластичности, причем не только в головном, но и в спинном мозге [5]. Однако эффективность идеомоторного тренинга зависит от того, насколько человек способен ярко и стабильно представлять движение собственной конечности. Технология ИМК позволяет зарегистрировать на электроэнцефалограмме (ЭЭГ) паттерны, соответствующие качественному представлению движения (эпизоды депрессии мю-ритма), и транслировать их пациенту в виде сигнала обратной связи [6, 7].

Поскольку основная часть исследований сфокусирована на разработке регламентов функционирования ИМК в лабораторных условиях со здоровыми, остается открытым вопрос, насколько пациенты с двигательными нарушениями способны успешно работать в контуре ИМК и как результативность этой работы зависит от объема дисфункции, очага поражения, давности заболевания и возраста.

Цель исследования — изучение характеристик биоэлектрической активности мозга пациентов с двигательными нарушениями при представлении движения в контуре ИМК для определения оптимальных путей использования идеомоторного тренинга на основе ИМК в медицинской реабилитации.

Материал и методы

В исследовании приняли участие 26 пациентов с двигательными нарушениями верхних конечностей. Дисфункция была вызвана полушарным ишемическим инсультом (ИИ) или травмой спинного мозга на уровне III—VII шейных позвонков (травматическая болезнь спинного мозга — ТБСМ). Все больные были разделены на 2 группы в соответствии с диагнозом. В 1-ю группу вошли 12 пациентов (9 мужчин, 3 женщины) с острым нарушением мозгового кровообращения (ОНМК), средний возраст $59,2 \pm 1,5$ года; во 2-ю — 14 пациентов (13 мужчин, 1 женщина) с ТБСМ, средний возраст $28,1 \pm 1,9$ года. Давность заболевания пациентов обеих групп варьировала от 1 нед до 11 лет.

При анализе результатов исследования использовались данные, полученные при аналогичном регламенте работы со здоровыми [11]. Контрольную группу составили 12 здоровых (6 мужчин, 6 женщин) в возрасте 19—29 лет (средний возраст $23,5 \pm 0,8$ года). В сравнительный анализ между группами включали данные, полученные только для представления движения в кистевом отделе рук, поскольку именно восстановление двигательной активности кисти имеет важное значение для целей нейрореабилитации. Среди предлагаемых пациентам движений это могли быть различные манипуляции с объектом (например, мысленное нажатие на клавиши), сжатие и

разжимание кулака, сгибание и разгибание кисти. Участникам контрольной группы предлагалось представлять движение последовательного сгибания и разгибания пальцев.

Исследование проводилось на 3 клинических базах: Городская клиническая больница №1 им. Н.И. Пирогова, Реабилитационный центр для инвалидов «Преодоление» и Городская поликлиника №36 (Москва). После подробного разъяснения регламента экспериментов пациенты подписывали добровольное информированное согласие. Протокол исследования получил одобрение этической комиссии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и локального этического комитета РНИМУ им. Н.И. Пирогова.

Экспериментальный регламент. Каждый пациент принял участие в 1—10 проводимых в разные дни экспериментальных сессиях продолжительностью 40—80 мин. Сессия включала 4—15 записей с идеомоторной тренировкой в контуре ИМК, во время которых чередовались задание на мысленное представление определенного движения рукой (экспериментальное условие) и исполнение когнитивной задачи на зрительное внимание в отсутствие двигательной активности (контрольное условие). Такая когнитивная задача позволяла генерировать воспроизводимую фоновую активность ЭЭГ и отвлекать испытуемого от двигательной задачи. Задачи кодировались с помощью условных рисунков на мониторе компьютера и длились по 12—14 с с межстимульным интервалом в 3—5 с. Во время сессий лечащим врачом осуществлялся контроль функционального состояния пациентов, в случаях их недомогания или дискомфорта исследование останавливалось.

Регистрация и анализ ЭЭГ. ЭЭГ регистрировалась с помощью энцефалографа NVX52 (ООО «Медицинские Компьютерные Системы», Россия) с использованием 30 хлор-серебряных электродов, расположенных по модифицированной системе 10—10 с максимальным охватом центральной области коры. Контактное сопротивление не превышало 20 кОм. Частота дискретизации сигнала составляла 500 Гц, использовались частотный фильтр 0,05—49 Гц и режектор помехи электросети 50 Гц. Запись данных велась в программе VCI2000 [8]. Оценка эффективности классификации в ИМК проводилась с помощью программной платформы Resonance (разработчик Ю.О. Нуждин).

Целью анализа паттернов ЭЭГ было нахождение индивидуальных пространственно-спектральных характеристик, наиболее реактивно отзывающихся на смену состояний (представление движения и когнитивная задача). Для анализа использовалась частотная полоса ЭЭГ 4—40 Гц. Далее пространственный домен сигнала преобразовывался при помощи CSP-фильтра. Полученные CSP-компоненты анализировались в спектральном домене с применением окон-

ного преобразования Фурье (длина окна — 1 с, сдвиг — 0,1 с). Затем вычислялась область перекрытия плотностей вероятностей для двух пространственно-спектральных компонентов в классифицируемых состояниях. Для оценки выраженности десинхронизации ЭЭГ при представлении движения использовали индекс ERDd — величину, обратную площади перекрытия плотностей вероятностей, который выражали в усл. ед. [9].

Индивидуальные комбинации пространственных и спектральных характеристик с максимальными различиями между двумя состояниями использовались для построения Байесовского классификатора, который обучался на плотностях вероятностей 3 оптимальных (наиболее реактивных при смене состояний) характеристик. Классификация состояния происходила при превышении апостериорной вероятности порога $p > 0,5$.

Для равномерной оценки точность классификации при работе с ИМК использовалась перекрестная проверка по схеме 5×2 . В качестве значения точности классификации принималось отношение верно распознанных попыток к их общему числу.

Топографическое картирование паттернов ЭЭГ. Для определения вклада отдельных отведений ЭЭГ в формирование паттерна десинхронизации индекс ERDd оценивался для каналов без пространственной CSP-фильтрации. В целях улучшения отношения сигнала к шуму у отдельных отведений и для устранения эффектов объемной проводимости к необработанной записи ЭЭГ перед частотным разложением применялся пространственный фильтр Лапласа [10, 11]. Полученные показатели ERDd наносились на двухмерную карту отведений ЭЭГ. Таким образом картировалась степень изменения спектральной мощности при представлении движения по сравнению с когнитивной задачей.

Для сравнения между группами применяли односторонний дисперсионный анализ, использовали критерии Краскела—Уоллиса и Манна—Уитни. Различия между показателями считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

С каждым пациентом было проведено от 1 до 10 тренировочных сессий (в среднем для группы ОНМК — 3,8, ТБСМ — 4,7). Все обследуемые участвовали в 5—18

записях ЭЭГ с представлением движения (в среднем для пациентов с ОНМК — 13,5 записи в сессию, для пациентов с ТБСМ — 10,2). Пациентам было предложено представлять индивидуальные движения, доступные и удобные для тренировки, а в целях единообразия для анализа данных все движения были разделены на три типа в соответствии с вовлекаемым отделом конечности.

Эффективность классификации в ИМК. Для оценки выбирались данные пациентов, принявших участие не менее чем в 2 экспериментальных сессиях с повторными записями при движении одного типа. Для пациентов с ОНМК точность классификации двух состояний (представление движения и когнитивная задача) составила в среднем $87 \pm 3\%$ (8 случаев), а для пациентов с ТБСМ $82 \pm 4\%$ (11 случаев). Согласно критерию Манна—Уитни, различий между двумя группами пациентов не выявлено.

Данные для движений в различных отделах руки приведены в **табл. 1**. Представление движений в проксимальном отделе (характеризуется большей подвижностью) удавалось классифицировать эффективнее, чем в дистальных отделах, где сохранилась только фрагментарная подвижность. Тем не менее односторонний дисперсионный анализ Краскела—Уоллиса не выявил статистической достоверности между группами, причиной чего может являться небольшой объем выборок. На эффективность классификации не оказывали влияния ни срок заболевания, ни величина двигательной дисфункции. У некоторых пациентов, перенесших ОНМК, лучше получалось представление движения здоровой рукой, у других — паретичной.

Для сравнения с контрольной группой применили односторонний дисперсионный анализ Краскела—Уоллиса, который не выявил значимых различий в результатах классификации в ИМК (**рис. 1**). Таким образом, пациенты обеих групп, которые участвовали в нескольких тренировочных сессиях с ИМК, показали высокую точность классификации, сопоставимую с результатами у здоровых.

Характеристика паттернов ЭЭГ при представлении движения. Поскольку имелась возможность оценить точность классификации в ИМК только для тех пациентов, которые смогли принять участие в нескольких экспериментальных сессиях, для более полной и корректной оценки способности испытуемых к представлению движений исследовали величину

Таблица 1. Точность классификации в ИМК при представлении движений в различных отделах руки на фоне контрольного состояния (%)

Группа	Плечо		Предплечье		Кисть	
	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука
ОНМК	91±4 (n=4)	89±6 (n=4)	92±1 (n=4)	92±2 (n=6)	85±3 (n=7)	91±3 (n=7)
ТБСМ	93±5 (n=2)	73±21 (n=2)	79±9 (n=4)	85±5 (n=7)	82±5 (n=10)	83±4 (n=9)

Примечание. Здесь и в табл. 2: данные представлены в виде ($M \pm m$).

Таблица 2. Значения десинхронизации ЭЭГ при представлении движений в различных отделах руки на фоне контрольного состояния (ERDd, усл. ед.)

Группа	Плечо		Предплечье		Кисть	
	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука	левая рука	правая рука
ОНМК	60,1±4,3 (n=9)	60,1±5,1 (n=10)	70±4,2 (n=8)	69,1±3,7 (n=9)	65,1±5,1 (n=9)	62±4,5 (n=10)
ТБСМ	59,8±2,7 (n=14)	64,5±2,8 (n=14)	58,5±2,5 (n=13)	57,9±2,6 (n=13)	60,2±3,2 (n=10)	58,3±3,9 (n=10)

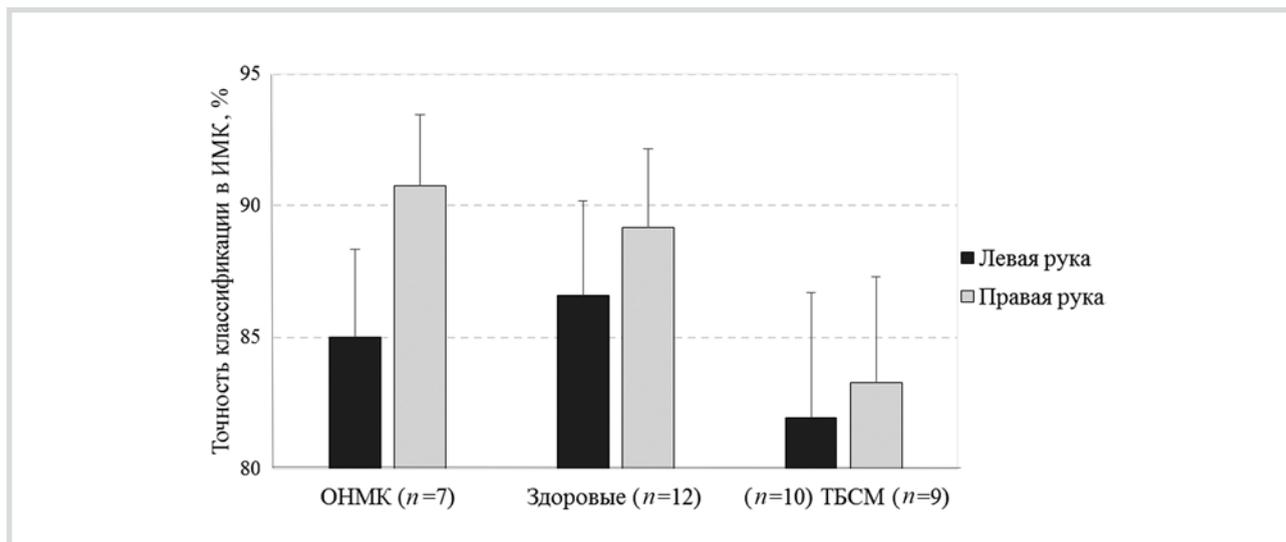


Рис. 1. Точность классификации в ИМК (%) при представлении движения в кистевом отделе руки на фоне контрольного состояния.

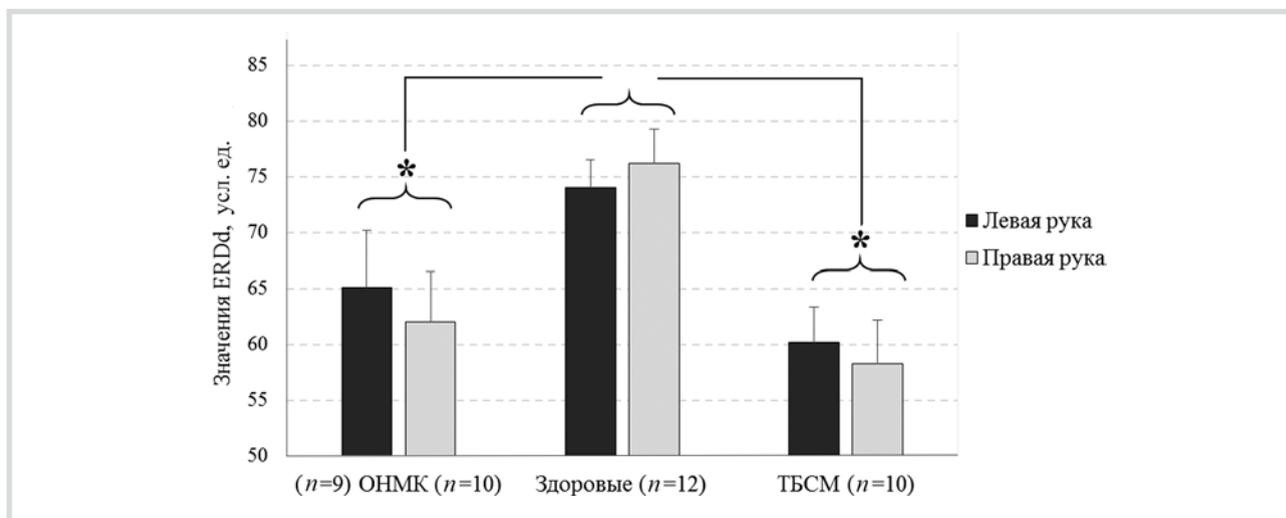


Рис. 2. Значения десинхронизации ЭЭГ (ERDd, усл. ед.) при представлении движений в кистях.

* — $p < 0,015$ по критерию Краскела—Уоллиса + попарно по критерию Манна—Уитни с поправкой Бонферрони. Для статистического анализа результаты, полученные при представлении движения правой и левой рукой, были объединены внутри обследуемых групп.

десинхронизации паттернов ЭЭГ при представлении движения. Результаты для движений в различных отделах руки представлены в **табл. 2**. Не было обнаружено статистически значимых различий по показателям десинхронизации ЭЭГ в обеих группах испытуемых ни для представления движения правой или левой рукой (сравнивались попарно по отделам руки, критерий Манна—Уитни, уровень значимости $p < 0,05$), ни между тремя классами движений (одно-

сторонний дисперсионный анализ Краскела—Уоллиса). Необходимо отметить, что у пациентов с ОНМК величина десинхронизации ЭЭГ при представлении движения не была связана со стороной поражения.

Сравнивали значения ERDd при представлении движений кистью для двух групп пациентов и группы здоровых (**рис. 2**). Три группы различались между собой (односторонний дисперсионный анализ

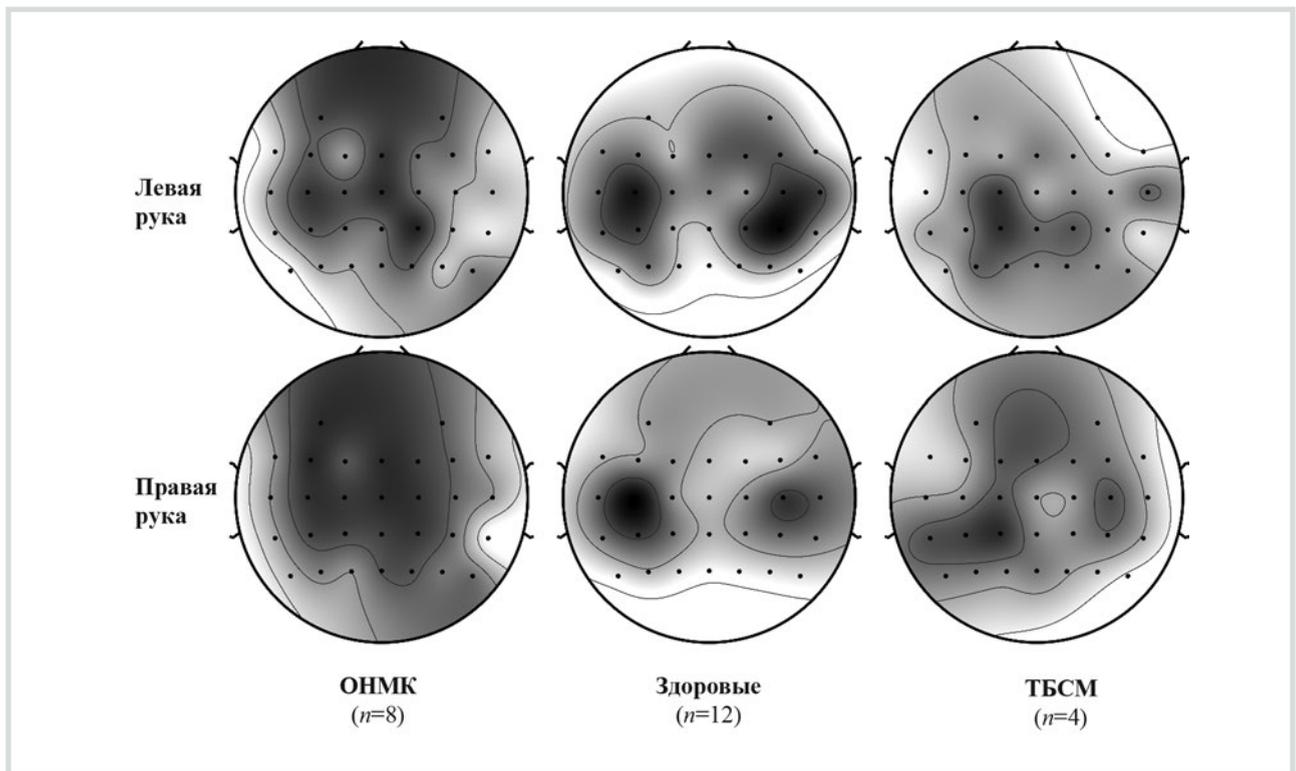


Рис. 3. Усредненные топографические карты паттернов ЭЭГ при представлении движений кистью левой и правой руки. Темный цвет соответствует наибольшей десинхронизации ЭЭГ (по показателю ERDd).

Краскела—Уоллиса), попарные сравнения по критерию Манна—Уитни с поправкой Бонферрони выявили значимые различия между группой здоровых и обеими группами пациентов. В то же время значения десинхронизации ЭЭГ при представлении движений кистью не различались между двумя группами пациентов.

Топографическое распределение десинхронизации ЭЭГ при представлении движения показывает активацию в сенсомоторных областях коры, что является типичным для данного состояния и наблюдается также у здоровых испытуемых (рис. 3). Десинхронизация ЭЭГ оказалась более выраженной в левом (доминантном) полушарии для всех типов движений.

Обсуждение и заключение

Эффективность классификации в ИМК. Для пациентов, принявших участие в 3 и более экспериментальных сессиях, была характерна высокая точность классификации в двухкомандном ИМК, сопоставимая с результатами, полученными ранее при работе со здоровыми (см. рис. 1). При этом результативность не зависела от давности и локализации поражения. При сравнении со здоровыми различий не было обнаружено не только у сопоставимых по возрасту пациентов группы ТБСМ, но и у пациентов пожилого возраста группы ОНМК.

Высокой вероятности верной классификации в двухклассовом ИМК (более 80%) мог способствовать индивидуальной подбор движений, что было показано и в предыдущих исследованиях [12]. Некоторым пациентам легче удается осуществлять простые изолированные движения, другим — сложные целоритмированные. Следующий подход, позволяющий добиться высокой точности работы в ИМК, — создание реалистичных контуров обратной связи [13] в том числе при помощи вибрационных датчиков на теле [14] или экзоскелета [15].

Характеристика паттернов ЭЭГ при представлении движения. Анализ десинхронизации ЭЭГ при представлении движения выявил, что у нескольких пациентов, принявших участие в малом количестве экспериментальных сессий (1—2), практически не наблюдалось реакции при переходе между состояниями. По этой причине они, скорее всего, не справились бы с управлением в ИМК, следовательно, точность классификации (описанная выше) была бы снижена.

Данные настоящего исследования показывают, что у пациентов с двигательными нарушениями вследствие неврологических заболеваний способность представлять движения руками снижена по сравнению со здоровыми (см. рис. 2). В то же время при прохождении достаточного количества тренировочных сессий с идеомоторными задачами больные успешно осваивают навык и начинают работать в

ИМК с высокой точностью, аналогичной результативности здоровых.

Топографическое распределение десинхронизации ЭЭГ у пациентов показывает типичную локализацию (рис. 3), следовательно, пациенты корректно представляли движения. Несмотря на малый объем сохранившихся движений, пациенты обеих групп показали способность к их представлению. Предыдущие исследования также продемонстрировали способность пациентов с пара- и гемиплегией к моторному представлению [16]. Несмотря на сопоставимую локализацию, очаги десинхронизации ЭЭГ у больных обеих групп были не такими обширными, как у здоровых. Это может быть связано с общим снижением уровня сенсомоторной десинхронизации при представлении движения, которое также является причиной видимой десинхронизации в лобных областях у пациентов, перенесших ОНМК (см. рис. 3).

Проведенное исследование показало, что при участии в 3 и более экспериментальных сессиях с идеомоторной тренировкой в контуре ИМК пациенты с ОНМК и ТБСМ с выраженными двигательными нарушениями верхних конечностей успешно обучались представлять движения руками. Участвующие

в исследовании пациенты показали характерное топографическое распределение десинхронизации ЭЭГ при представлении движений руками, не отличающееся от результатов здоровых. После нескольких тренировок все пациенты были способны управлять в двухкомандном ИМК с высокой точностью, сопоставимой с таковой у здоровых. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования идеомоторного тренинга в контуре ИМК для нейрореабилитации пациентов с нарушениями движения.

Авторский коллектив выражает благодарность генеральному директору и руководителю социальной службы РЦ «Преодоление» Л.П. Кезиной и Р.С. Курбанову за организацию и содействие исследованиям, врачу-неврологу, д.м.н. Н.В. Тутер за организацию тестирования на поликлиническом уровне и Ю.О. Нуждину за подготовку программного обеспечения для анализа данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Гусев Е.И., Скворцова В.И., Стаховская Л.В. Проблема инсульта в Российской Федерации: время активных совместных действий. *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2007;107(8):1-11. [Gusev EI, Skvortsova VL, Stakhovskaya LV. Stroke in the Russian Federation: time for united concentrated activities. *Zhurnal Nevrologii i Psihiatrii im. S.S. Korsakova*. 2007;107(8):1-11. (In Russ.)].
2. Каплан А.Я. Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг машинных интерфейсов в неврологической реабилитации. *Физиология человека*. 2016;42(1):118-127. [Kaplan AY. Neurophysiological foundations and practical realizations of the brain-machine interfaces the technology in neurological rehabilitation. *Human Physiology*. 2016;42(1):118-127. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164616010100>
3. Weinberg R. Does imagery work? Effects on performance and mental skills. *Journal of Imagery Research in Sport and Physical Activity*. 2008;3(1):1-21. <https://doi.org/10.2202/1932-0191.1025>
4. Malouin F, Jackson PL, Richards CL. Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013;7:576. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00576>
5. Wolpaw JR, Tennissen AM. Activity-dependent spinal cord plasticity in health and disease. *Ann Rev Neurosci*. 2001;24(1):807-843. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.807>
6. Wolpaw JR. Brain—computer interfaces as new brain output pathways. *J Physiol*. 2007;579(3):613-619. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.125948>
7. Ang KK, Guan C. EEG-based strategies to detect motor imagery for control and rehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2017;25(4):392-401. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2646763>
8. Schalk G, McFarland DJ, Hinterberger T, Birbaumer N, Wolpaw JR. BCI2000: a general-purpose brain—computer interface (BCI) system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2004;51(6):1034-1043. <https://doi.org/10.1109/tbme.2004.827072>
9. Vasilyev A, Liburkina S, Yakovlev L, Perepelkina O, Kaplan A. Assessing motor imagery in brain—computer interface training: Psychological and neurophysiological correlates. *Neuropsychologia*. 2017;97:56-65. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.02.005>
10. Perrin F, Pernier J, Bertrand O, Echallier J. Spherical splines for scalp potential and current density mapping. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1989;72(2):184-187. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(89\)90180-6](https://doi.org/10.1016/0013-4694(89)90180-6)
11. Васильев А.Н., Либуркина С.П., Каплан А.Я. Латерализация паттернов ЭЭГ у человека при представлении движений руками в интерфейсе мозг—компьютер. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2016;66(3):302-312. [Vasilyev AN, Liburkina SP, Kaplan AY. Later-alization of EEG patterns in humans during motor imagery of arm movements in the brain—computer interface. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deiatelnosti im. I.P. Pavlova*. 2016;66(3):302-312. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0044467716030126>
12. Leeb R, Lee F, Keirath C, Scherer R, Bischof H, Pfurtscheller G. Brain—computer communication: motivation, aim, and impact of exploring a virtual apartment. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2007;15(4):473-482. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.906956>
13. Mulder T. Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation. *J Neural Transm (Vienna)*. 2007;114(10):1265-1278. <https://doi.org/10.1007/s00702-007-0763-z>
14. Либуркина С.П., Васильев А.Н., Яковлев Л.В., Гордлеева С.Ю., Каплан А.Я. Интерфейс мозг—компьютер на основе представления движения с вибротактильной модальностью стимулов. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2017;67(4):414-429. [Liburkina SP, Vasilyev AN, Yakovlev LV, Gordleeva SYu, Kaplan AY. Motor imagery based brain computer interface with vibrotactile interaction. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deiatelnosti im. I.P. Pavlova*. 2017;67(4):414-429. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0044467717040049>
15. Фролов А.А., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д., Мокиенко О.А., Платонов А.К., Пряничников В.Е., Черникова Л.А. Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг—компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетом. *Физиология человека*. 2013;39:99-113. [Frolov AA, Biryukova EV, Bobrov PD, Mokienco OA, Platonov AK, Pryanichnikov VE, Chernikova LA. Principles of Neurorehabilitation Based on Brain—Computer Interface and Biologically Plausible Control of the Exoskeleton. *Fiziologiya Cheloveka*. 2013;39:99-113. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0131164613020033>
16. Birbaumer N, Cohen LG. Brain—computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis. *The Journal of Physiology*. 2007;579(3):621-636. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.125633>