

УДК 616.74-009.11

## ИНТЕРФЕЙС МОЗГ–КОМПЬЮТЕР: ПЕРВЫЙ ОПЫТ КЛИНИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИИ

© 2016 г. О. А. Мокиенко<sup>1,2</sup>, Р. Х. Люкманов<sup>1</sup>, Л. А. Черникова<sup>1,2</sup>, Н. А. Супонева<sup>1</sup>,  
М. А. Пирадов<sup>1</sup>, А. А. Фролов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Научный центр неврологии, Москва

<sup>2</sup>ГБОУ ВПО Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва

<sup>3</sup>ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, Москва

E-mail: xarisovich@gmail.com

Поступила в редакцию 01.06.2015 г.

Воображение движений может стимулировать те же нейропластические механизмы мозга, что и их реальное исполнение. Контролировать воображение движения можно при помощи интерфейса мозг–компьютер (ИМК), который преобразует ЭЭГ-сигналы мозга, возникающие при воображении движения, в команды внешнему устройству. Представлены результаты двухэтапного исследования применения неинвазивного ИМК в реабилитации пациентов с выраженным гемипарезом вследствие очагового повреждения головного мозга. Показано, что обучение управлению ИМК не зависит от давности заболевания, локализации очага поражения и тяжести неврологического дефицита. На первом этапе исследования с участием 36 пациентов показано, что эффективность восстановительной терапии была выше в группе с включением в реабилитационную программу тренировки управления ИМК (в группе ИМК улучшение по шкале ARAT с 1 [0; 2] до 5 [0; 16] баллов,  $p = 0.012$ ; в контрольной группе значимого улучшения не наблюдалось). На втором этапе исследования с участием 19 пациентов применялся комплекс ИМК–экзоскелет. На фоне курса реабилитации с применением данной технологии наблюдалось улучшение двигательной функции руки по шкалам ARAT (с 2 [0; 37] до 4 [1; 45.5] баллов,  $p = 0.005$ ) и Fugl–Meyer (с 72 [63; 110] до 79 [68; 115] баллов,  $p = 0.005$ ).

**Ключевые слова:** воображение движения, гемипарез, нейрореабилитация, интерфейс мозг–компьютер, экзоскелет.

DOI: 10.7868/S0131164616010136

Интерфейс мозг–компьютер (ИМК) — это технология, позволяющая осуществлять преобразование данных об электрической или метаболической активности мозга человека или животного в сигналы управления внешним техническим устройством [1–3].

В качестве сигнала об активности мозга в неинвазивном ИМК наиболее часто используют реакцию синхронизации/десинхронизации сенсомоторного ритма (СМР) электроэнцефалограммы (ЭЭГ-ритм в диапазоне 8–12 Гц) над областями первичных соматосенсорной и моторной коры, соответствующую процессу воображения движения [4, 5].

Применение именно сенсорно-моторных ритмов ЭЭГ в ИМК представляется наиболее перспективным: данный нейрофизиологический феномен устойчиво ассоциирован с двигательными областями мозга, при этом десинхронизация сенсомоторного ритма не требует реального движе-

ния, а только его воображения [5]. Таким образом, естественным типом ментальной деятельности, который может быть распознан в системе ИМК, является просто воображение движения какого-либо исполнительного органа (конечности, языка). Кроме того, воображение движений разных органов создает разное распределение активности по поверхности коры и, соответственно, разные пространственные паттерны ЭЭГ, что облегчает задачу классификатора интерфейса [6, 7].

Научным обоснованием применения в нейрореабилитации ИМК, базирующегося на таком принципе, являются данные о влиянии процесса воображения движения на нейропластичность, а также тот факт, что воображение движения является единственной активной парадигмой для модуляции процессов нейропластичности в двигательных зонах головного мозга при плегии, то есть при полном отсутствии движений в конечности [8–10].

С развитием концепции нейропластичности была показана значимость обратной связи, предъявляемой пациенту при обучении. Синхронное предоставление объективной информации о выполнении движения с помощью роботизированных ортезов, визуальных данных повышает качество обучения: пациент получает инструмент для произвольного контроля собственного движения, а усиление тактильной, проприоцептивной, зрительной афферентации дополнительно активирует структуры головного мозга, лишенные или ограниченные в получении сенсорной информации вследствие инсульта [11, 12]. Немаловажным является применение технологий роботизированной терапии, обеспечивающих высокую повторяемость движения с оптимальной интенсивностью тренировок [13]. Также одним из основополагающих принципов нейрореабилитации является раннее начало восстановительных мероприятий [14]. Комплекс ИМК позволяет реализовать практически все современные принципы нейрореабилитации.

В России ранее не проводились исследования ИМК в двигательной реабилитации пациентов неврологического профиля. Основными предпосылками для начала данной работы стали нерешенные вопросы о возможности обучения управлению ИМК, основанного на воображении движения, у пациентов с обширным повреждением двигательной коры, а также необходимость изучения клинической эффективности применения этой технологии у больных с грубыми двигательными нарушениями.

## МЕТОДИКА

Исследование проходило в два этапа: в 2011–2013 гг. (первый этап) на базе ФГБНУ Научный центр неврологии и с 2014 г. (второй этап) в совместной работе ФГБНУ Научный центр неврологии, РНИМУ им. Н.И. Пирогова и МНИКИ им. М.Ф. Владимирского. В настоящей работе приводятся данные, полученные на базе ФГБНУ Научный центр неврологии. Протокол исследования был одобрен локальным этическим комитетом ФГБНУ Научный центр неврологии.

Критерии включения в исследование: пациенты мужского и женского пола в возрасте 18–80 лет с подтвержденным первичным нарушением мозгового кровообращения по ишемическому или геморрагическому типу давностью от 1 месяца или с травмой головного мозга с единичным очагом повреждения по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ), имеющие парез или плегию в кисти.

Критерии не включения в исследование: грубые когнитивные нарушения, сенсорная афазия (нарушение способности понимать речь), грубая

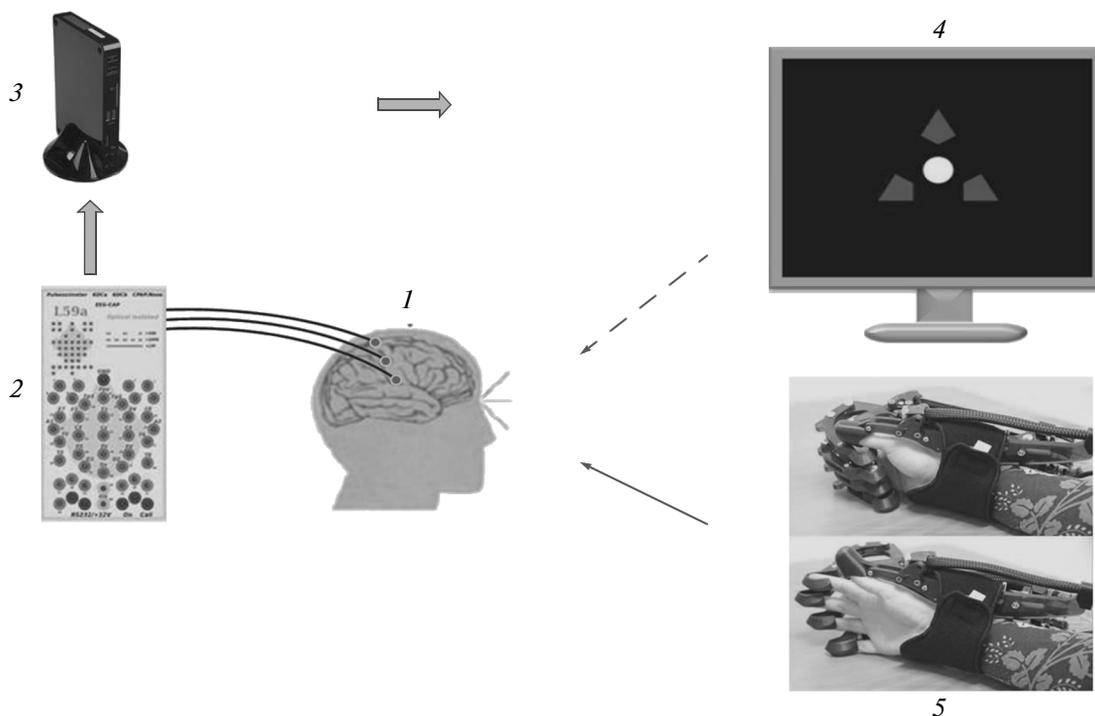
моторная афазия (нарушение способности говорить), грубое нарушение зрения, не позволяющее выполнять визуальные инструкции на экране компьютера.

В исследовании использовался неинвазивный ИМК, основанный на анализе паттернов ЭЭГ при воображении движения рук. Комплекс ИМК состоит из следующих элементов (рис. 1): система активных электродов ActiCap фирмы Brain Products (Германия) для регистрации ЭЭГ; энцефалограф NBL640 производства ООО “НейроБиоЛаб”; персональный компьютер (операционная система Windows 7) с программным обеспечением для синхронной передачи данных, выделения рабочих показателей ЭЭГ и классификации сигналов для распознавания управляющей команды в реальном времени; экзоскелет кисти (роботизированный ортез) производства ООО “Нейроботикс”. Экзоскелет кисти входил в состав комплекса ИМК только на втором этапе исследования.

Регистрация ЭЭГ проводилась с помощью 30 электродов, расположенных по международной схеме 10–20. Под каждый электрод наносился специальный гель для улучшения контакта с поверхностью головы. Сигналы ЭЭГ фильтровались в полосе частот от 5 до 30 Гц. В исследовании применялся классификатор паттернов ЭЭГ, основанный на методе Байеса. В качестве показателя точности классификации использовались индекс “каппа Коэна” (при идеальном распознавании  $\kappa = 1$ , при случайном распознавании  $\kappa = 0$ ) [15] и процент правильных ответов классификатора (распознавание выше случайного при  $>35\%$ ). Определение источников активности, наиболее значимых для функционирования ИМК, проводилось с помощью метода независимых компонент (ICA, Independent Component Analysis).

Во время тренировки пациент сидел в удобном кресле так, что голова находилась на расстоянии 1 метра от компьютерного монитора, на котором ему предъявлялись визуальные инструкции. В центре экрана находилась округлая метка, служившая для фиксации взгляда, и расположенные вокруг нее 3 ромбовидные стрелки, менявшие цвет для обозначения инструкций. Пациент выполнял одну из трех инструкций: расслабиться (верхняя стрелка), вообразить движение левой или правой руки (левая или правая стрелки соответственно). По инструкции расслабиться (покой) испытуемый должен был спокойно сидеть и смотреть в центр экрана. Инструкции по воображению движения предъявлялись в случайном порядке, каждая в течение 10 секунд с обязательным периодом покоя между ними длительностью 10 секунд.

На первом этапе исследования в качестве воображаемого движения пациенту предлагалось кинестетически представлять медленное сжатие



**Рис. 1.** Блок-схема комплекса интерфейс мозг–компьютер (ИМК), применяемого в данном исследовании. 1 – электроды ЭЭГ; 2 – энцефалограф; 3 – компьютер: передача данных в реальном времени, выделение рабочих показателей ЭЭГ, распознавание управляющей команды; 4 – презентационный монитор; 5 – экзоскелет. Пунктирная стрелка – визуальная обратная связь, непрерывная стрелка – кинестетическая обратная связь.

кисти в кулак. Результаты распознавания выполняемой ментальной задачи предъявлялись пациенту по зрительной обратной связи: метка в середине экрана, фиксирующая взор, принимала зеленый цвет, если классификатор распознавал задачу, соответствующую предъявляемой инструкции движения, и оставалась белой, если распознавалась другая задача.

На втором этапе исследования в качестве воображаемого движения пациенту предлагалось кинестетически представлять медленное разгибание пальцев. Результаты распознавания такого воображения предъявлялись как с помощью визуальной, так и с использованием кинестетической обратной связи: в случае успешного распознавания классификатором задачи, закрепленный на паретичной руке экзоскелет кисти разгибал пальцы.

С каждым пациентом основной группы первого этапа и со всеми пациентами второго этапа исследования тренировки проводили в течение 10–15 дней, по одной в день, продолжительностью 20–30 минут. Интервалы между тренировками составляли от 1 до 4 дней.

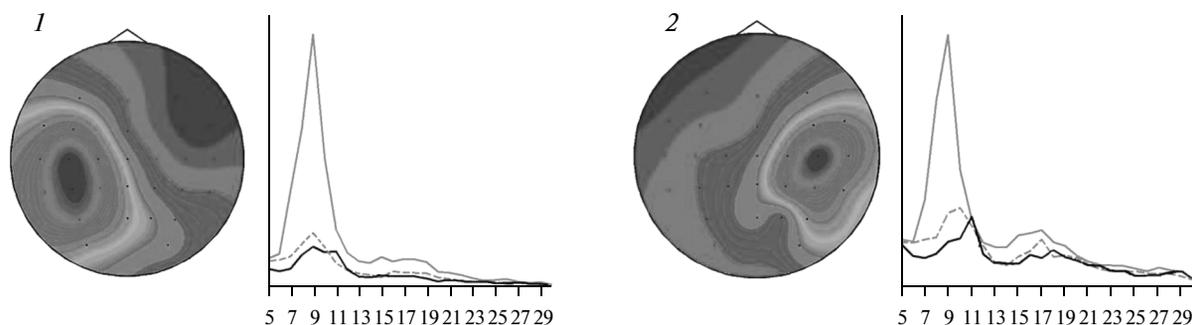
Для оценки двигательной функции руки до начала и по окончании курса реабилитации применяли шкалы: Action Research Arm Test (ARAT), Modified Ashworth Scale (MAS) – на первом и вто-

ром этапах исследования и Fugl-Meyer (на втором этапе исследования).

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью критериев Манна–Уитни и Вилкоксона на персональном компьютере с применением пакета прикладных программ STATISTICA (StatSoft®). Данные представлены в виде медианы и 25%, 75% квартилей медианы. Статистически значимыми различия считались при  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Первый этап исследования.** На первом этапе в исследовании участвовали 36 пациентов с гемипарезами в результате очагового поражения головного мозга вследствие инсульта или травмы, из них 26 мужчин и 10 женщин, в возрасте от 34 до 70 лет (медиана – 52.5 [42.5; 57] лет), с давностью заболевания от 1 месяца до 8 лет (медиана давности заболевания составила 11.5 [3; 21.5] месяцев). В раннем восстановительном периоде находились 14 пациентов, в позднем и резидуальном – 22 пациента. У большинства пациентов (25 из 36) характер нарушения мозгового кровообращения был ишемический, у 10 из 36 – геморрагический и у 1 пациента – причиной очагового повреждения головного мозга являлась тяжелая черепно-мозговая травма. Очаг поражения локализовался



**Рис. 2.** Топографические распределения значимых компонент и спектральные плотности их интенсивности при трех ментальных состояниях у пациента с подкорковым повреждением головного мозга. 1 – первая компонента (левое полушарие), 2 – вторая компонента (правое полушарие). Серые линии – состояние покоя, черные линии – воображение движения левой руки, пунктирные линии – правой руки.

в правом полушарии у 20 пациентов, в левом – у 14, и у 2 пациентов – в стволе головного мозга. Среди наблюдаемых больных корково-подкорковое повреждение было у 2 пациентов, подкорковое – у 34 пациентов. У всех пациентов в клинической картине наблюдался грубый парез в руке или плечег: медиана по шкале ARAT составляла 0 [0; 4]. Шестнадцать пациентов составили основную группу, в комплексное лечение которых были включены тренировки ИМК, и 20 пациентов были включены в группу сравнения, они получали только традиционную комплексную терапию. Основная группа и группа сравнения были сопоставимы по возрасту, давности заболевания и степени выраженности неврологического дефицита. Все испытуемые – правши. Все пациенты перед началом исследования подписали добровольное информированное согласие.

**Способность управлять ИМК.** Обучение управлению ИМК полностью прошли 13 пациентов с очаговым повреждением головного мозга (основная группа). Процент правильного распознавания классификатором металльных задач составил 55.5 [45; 59.5]%, показатель “каппа Коэна” – 0.37 [0.19; 0.43]. Качество управления ИМК не зависело от латерализации очага повреждения (при сравнении подгрупп пациентов с левосторонним или правосторонним гемипарезом:  $p = 0.89$ ) и реабилитационного периода (при сравнении пациентов в раннем или позднем и резидуальном периоде  $p = 0.08$ ).

Таким образом, несмотря на наличие очагового повреждения головного мозга и выраженного нарушения двигательной функции кисти, пациентам с разной давностью заболевания удавалось управлять ИМК, основаны на регистрации сенсомоторного ритма.

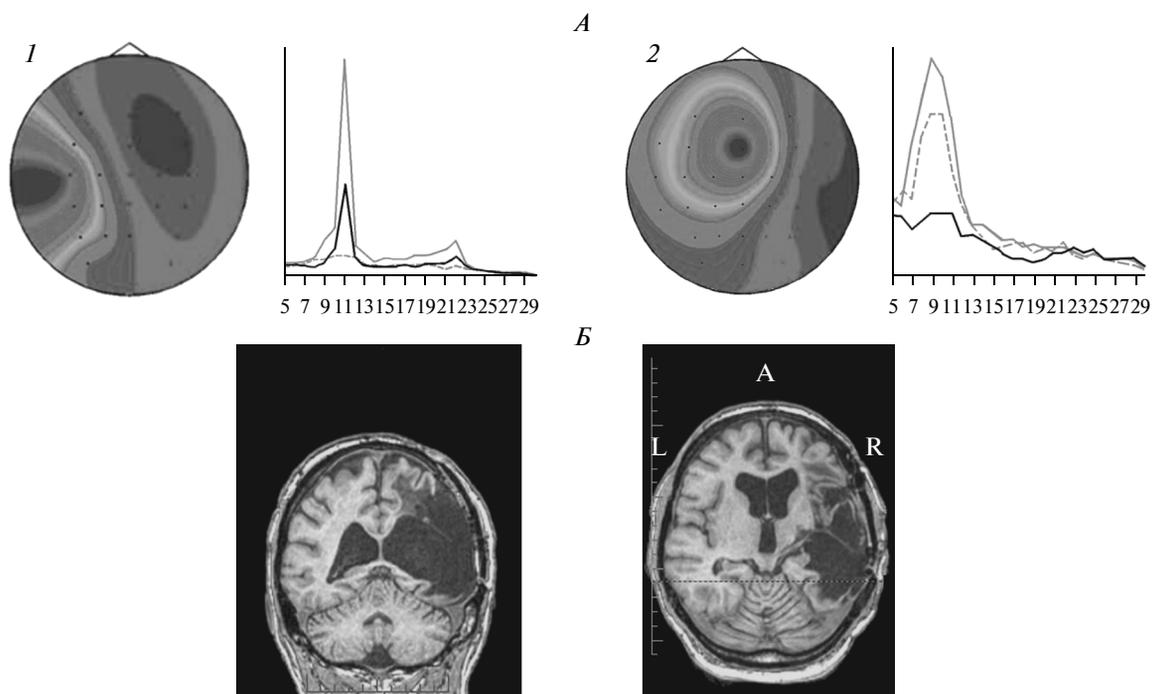
**Значимые для управления ИМК компоненты при корково-подкорковой и подкорковой локализации очага повреждения.** У пациентов с подкорковой локализацией очага поражения выявлялись

2 наиболее значимые для управления ИМК компоненты (ЭЭГ-сигналы активности мозга, распознаваемые как управляющие команды). Топографическое распределение этих компонент было аналогично таковому у здоровых людей и соответствовало расположению предствительства рук в первичных сенсомоторных областях центральной борозды коры головного мозга как здорового полушария, так и полушария с очагом инсульта (рис. 2).

Обе значимые для управления ИМК компоненты были связаны с модуляцией сенсомоторного ритма (СМР) в процессе воображения движения: у 10 пациентов с подкорковой локализацией инсульта во время воображения движения происходила реакция десинхронизации ЭЭГ-ритма в диапазоне мю-альфа, и у 1 пациента – мю-альфа и частично мю-бета ритма. У 4 пациентов реакция десинхронизации была неспецифической для каждой руки: одинаковая десинхронизация СМР при воображении сжатия кисти происходила как в контралатеральном так и в ипсилатеральном полушарии.

При обширном повреждении двигательной коры (1 пациент с инсультом корково-подкорковой локализации и 1 пациент с посттравматическим повреждением серого и белого вещества одного из полушарий) в здоровом полушарии выделялась компонента, аналогичная “норме” как по локализации, так и по спектральной плотности. В поврежденном полушарии компоненты с типичной локализацией не было выявлено. Однако у таких пациентов регулярно регистрировался источник сигнала с локализацией в области проекции Cz-электрода (рис. 3).

У одного из пациентов с повреждением двигательной коры (женщина 66 лет, давность инсульта – 22 месяца, ARAT = 0) в данном источнике во время воображения движения происходила неспецифическая для каждой из рук десинхронизация сенсомоторного ритма.



**Рис. 3.** Топографические распределения двух наиболее значимых компонент и спектральные плотности их интенсивности при трех ментальных состояниях у пациента с обширным корково-подкорковым повреждением головного мозга. 1 – первая компонента (левое полушарие), 2 – вторая компонента (область электрода Cz). На А: серые линии – состояние покоя, черные линии – воображение движения левой руки, пунктирные линии – правой руки. На Б – МРТ-изображения головного мозга данного пациента: обширное корково-подкорковое повреждение правого полушария.

У второго пациента с обширным повреждением правого полушария, включая двигательные области коры (рис. 3, Б), значимая компонента с локализацией в теменной области была связана с десинхронизацией СМР на фоне воображения движения левой (паретичной) руки, то есть была специфична именно для воображения сжатия паретичной руки (рис. 3, А). Эта компонента также была постоянной и регистрировалась каждый тренировочный день. На рис. 3, Б представлены магнитно-резонансно-томографические (МРТ) изображения головного мозга данного пациента (мужчина, 54 года): обширное посттравматическое повреждение правого полушария головного мозга. Давность заболевания у пациента – 8 лет, клинически: гемиплегия (ARAT = 0), спастичность – 3–4 балла, гемианопсия, когнитивные функции сохранены. Достигнутый процент распознавания при ИМК-тренировках – 63%. Восстановления двигательных функций у обоих пациентов не произошло.

Среди пациентов встречались следующие варианты изменения активности мозга, с которыми было связано улучшение качества управления ИМК (овладение навыком управления ИМК): а) выделение значимых компонент с первых дней и усиление реакции десинхронизации в процессе тренировки; б) отсутствие значимых компонент в

первые дни и появление их в процессе тренировки с последующим усилением реакции десинхронизации. Топографическое распределение не менялось для каждой из значимых компонент в результате тренировки.

Таким образом, при подкорковом очаге повреждения головного мозга локализация и спектральная плотность значимых для управления интерфейсом ЭЭГ-сигналов активности мозга такие же, как и у здоровых. При обширном повреждении двигательной коры значимая компонента в поврежденном полушарии не регистрируется. Однако компонента с локализацией в зоне вертекса у этих пациентов встречается регулярно и в данном источнике может наблюдаться десинхронизация СМР при воображении движения кисти.

*Эффективность методики ИМК в комплексном лечении больных с очаговым поражением головного мозга.* Для оценки клинической эффективности восстановительной терапии у больных с центральным парезом руки был проведен сравнительный анализ восстановления двигательной функции в основной группе (16 пациентов) и группе сравнения (20 пациентов). Следует отметить, что в данное исследование как в основную группу, так и в группу сравнения были включены больные только с пlegией или грубым парезом в кисти с плохим прогнозом в отношении восста-

**Таблица 1.** Результаты оценки двигательной функции руки по шкале ARAT до и после реабилитации

	До	После	<i>P</i>
Основная группа	1 [0; 4.5]	5 [0;16]	0.012
Группа сравнения	0 [0; 4]	0 [0; 5]	0.480

новления движений. У пациентов основной группы после проведенной терапии выявлено статистически значимое улучшение двигательной функции руки (по шкале ARAT). В группе сравнения значимого улучшения нарушенных двигательных функций не наблюдалось. Различия в улучшении функции руки между группами статистически значимо ( $p = 0.024$ ). Результаты оценки двигательной функции руки в динамике у пациентов основной группы и группы сравнения представлены в табл. 1.

Для оценки влияния тренировок с применением технологии ИМК на выраженность двигательных нарушений в руке при разной давности инсульта или травмы пациенты каждой группы были разделены на 2 подгруппы в зависимости от давности заболевания (реабилитационного периода): в первую подгруппу были включены больные с давностью инсульта до 6 месяцев, во вторую – свыше 6 месяцев.

Среди пациентов основной группы в раннем реабилитационном периоде находилось 5 человек (1 пациент в дальнейшем выбыл из исследования), в позднем и резидуальном реабилитационном периоде – 11 человек (2 пациента в дальнейшем выбыло из исследования). В группе сравнения 9 человек находились в раннем восстановительном периоде, 11 человек – в позднем и резидуальном восстановительном периоде.

Результаты оценки двигательной функции руки в динамике в зависимости от реабилитационного периода представлены в табл. 2. При анализе результатов выявлено статистически значимое улучшение двигательной функции руки у пациентов основной группы, находящихся в раннем вос-

становительном периоде. Среди пациентов группы сравнения, а также пациентов основной группы в позднем и резидуальном восстановительном периоде статистически значимого улучшения не выявлено.

Вместе с тем, сравнительный анализ результатов выявил большее относительное улучшение двигательной функции руки в основной группе по сравнению с группой сравнения у пациентов всех подгрупп.

Таким образом, проведенное исследование показало, что эффективность восстановительной терапии была выше в группе с включением в реабилитационную программу тренировки воображения движения, контролируемого интерфейсом мозг–компьютер, в особенности у пациентов в раннем восстановительном периоде.

У 3 из 4 пациентов в раннем восстановительном периоде и у 1 пациентки в позднем восстановительном периоде произошло клинически значимое улучшение двигательной функции кисти, выражающееся в появлении возможности брать некоторые предметы со стола, открывать дверную ручку.

**Второй этап исследования.** На втором этапе в исследование было включено 19 пациентов с последствиями инсульта, медиана возраста – 49 [41; 57] лет, 14 мужчин и 5 женщин. Ишемический инсульт перенесли 68% пациентов, геморрагический – 32%, медиана давности заболевания составила 7 [4.5; 13.5] месяцев, при этом 8 пациентов находились в раннем, 5 – в позднем и 6 в резидуальном реабилитационном периоде. Локализация постинсультного очага в левом полушарии была у 10 пациентов, в правом – у 9. Степень пареза руки по шкале ARAT составила 2 [0; 37] балла (из 57 возможных), по шкале Fugl-Meyer – 20 [9; 53] балла (из 66 возможных), что соответствует грубому парезу или плегии. Степень спастичности руки по шкале MAS составила 2 [1; 3] балла.

**Таблица 2.** Результаты оценки двигательной функции руки по шкале ARAT до и после восстановительной терапии в зависимости от реабилитационного периода

Группа	Период					
	ранний реабилитационный			поздний и резидуальный		
	до	после	<i>p</i>	до	после	<i>p</i>
Основная группа	1 [0; 2]	12.5 [4.5; 18]	<b>0.04</b>	1 [0; 4]	5 [0; 5]	>0.05
Группа сравнения	0 [0; 4]	0 [0; 4]	>0.05	0 [0; 6]	0 [0; 8]	>0.05

*Примечание:* жирным шрифтом выделен статистически значимый результат.

**Таблица 3.** Динамика показателей функции руки по клиническим шкалам

Шкала	До реабилитации	После реабилитации	<i>p</i>
ARAT	2 [0; 37]	4 [1; 45.5]	0.005
Fugl-Меуег для руки	72 [63; 110]	79 [68; 115]	0.005
• активные движения в руке	20 [9; 53]	25 [14; 56]	<0.001
○ проксимальные отделы	19 [7; 37]	19 [13; 37]	0.010
○ дистальные отделы	2 [1; 16]	6 [2; 19]	0.003
• чувствительность	10 [5; 12]	10 [7; 12]	0.050
• объем пассивных движений	21 [19; 23]	21 [19; 24]	0.443
MAS	2 [1; 3]	2 [0; 3]	0.343

Все испытуемые – правши. Все пациенты перед началом исследования подписали добровольное информированное согласие.

*Динамика показателей функции руки на фоне реабилитации.* На фоне курса реабилитации с включением в программу тренировок по управлению ИМК с кинестетической обратной связью наблюдалось статистически значимое улучшение двигательной функции руки по шкалам ARAT и Fugl–Меуег. При этом более выраженное улучшение наблюдалось в дистальных отделах руки (табл. 3).

В целом, процедуры тренинга с ИМК переносились пациентами хорошо. У одного пациента отмечалась выраженная общая слабость по окончании 20-минутной тренировки. Использование роботизированного устройства не приводило к нарастанию явлений спастичности (табл. 3).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Впервые в России было проведено двухэтапное клиническое исследование возможности применения технологии ИМК в реабилитации пациентов с очаговыми повреждениями головного мозга с использованием визуальной или кинестетической обратной связи и описаны нейрофизиологические особенности активации головного мозга при управлении ИМК у пациентов с разной локализацией очага поражения головного мозга.

В нашем исследовании было показано, что, несмотря на наличие очагового повреждения головного мозга с сопутствующим тяжелым моторным дефицитом в руке, пациентам, так же как и здоровым людям, удается управлять ИМК, основанным на регистрации сенсомоторного ритма при воображении движения. При этом качество управления ИМК не зависело от обширности повреждения головного мозга и давности заболевания. В литературе есть указания на то, что пациенты с очаговым повреждением головного мозга, так же как и здоровые люди, могут управлять

ИМК с помощью модуляции СМР [16]. Однако ранее считалось, что повреждение первичной сенсорно-моторной коры исключает овладение управлением ИМК с помощью модуляции СМР при воображении движения. Пациентов такого профиля не включали в подобные исследования [17]. Одним из результатов нашего исследования стало выявление у пациентов с обширным повреждением первичной соматосенсорной и моторной коры ЭЭГ-компоненты в области вертекса (проекция С<sub>z</sub>-электрода), значимой для управления интерфейсом. А. Фролов и соавт. [18] описали локализацию подобной компоненты методом решения обратной задачи ЭЭГ у здоровых людей в дополнительной моторной коре (SMA), что позволило предположить такую же локализацию данного источника у пациентов.

Этот результат открывает возможности применения неинвазивного, основанного на воображении движения ИМК у пациентов с обширным повреждением первичной моторной и соматосенсорной коры. Если прогноз на восстановление у таких пациентов неблагоприятен, неинвазивный ИМК на основе воображения движения в перспективе возможно использовать в качестве ассистирующей технологии (например, для управления экзоскелетом или любым другим техническим устройством), что может повысить качество жизни и степень самообслуживания.

На первом этапе исследования также показано, что эффективность восстановительной терапии была выше в группе с включением в реабилитационную программу тренировки воображения движения, контролируемого интерфейсом мозг–компьютер, в особенности у пациентов в раннем восстановительном периоде. Эффективность серии тренировок воображения движения с использованием ЭЭГ-ИМК ранее (до проведения первого этапа нашего исследования) не изучалась в контролируемых исследованиях с участием группы сравнения. Важно отметить, что в нашем исследовании принимали участие пациенты с

наиболее тяжелыми двигательными нарушениями в кисти (плегия или грубый парез). Прогноз на восстановление у таких пациентов был неблагоприятен. Тем не менее, у 3 из 4 пациентов в раннем восстановительном периоде и у 1 пациентки в позднем восстановительном периоде произошло клинически значимое улучшение двигательной функции кисти, выражающееся в появлении возможности брать некоторые предметы со стола, поворачивать дверную ручку.

На втором этапе исследования показана возможность управления интерфейсом мозг–компьютер с использованием кинестетической обратной связи пациентами с разной степенью неврологического дефицита и на разных сроках после инсульта. В последнее время появляются публикации результатов исследований неинвазивных ИМК в нейрореабилитации. В 2014 г. Ang K. и соавт. [19] опубликовали результаты слепого рандомизированного исследования, в котором реабилитационный робот для руки – MIT-Manus использовался в системе ИМК и управление которого осуществлялось ЭЭГ-сигналами мозга, возникающими при воображении движения. В исследовании участвовало 26 больных с грубым постинсультным гемипарезом [19]. Эффекты лечения сравнивались между группой больных, получавших ИМК + MIT-Manus (11 человек), и группой больных, получавших только робот-терапию с MIT-Manus (14 человек). Лечение продолжалось 4 недели и по его окончании эффективность терапии была сопоставима в обеих группах, однако через 12 недель от начала лечения в группе ИМК+MIT-Manus у большего количества больных (63.6%), отмечалось дальнейшее улучшение двигательных функций в руке по сравнению с контрольной группой, в которой дальнейшее улучшение наблюдалось только у 35.7%.

В продолжение второго этапа нашего исследования планируется оценка эффективности технологии ИМК-экзоскелет в сравнении с группой плацебо, а также анализ отдаленных результатов терапии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практической значимостью нашего исследования и дальнейших исследований в данном направлении станет возможность разработки протокола клинического применения технологии экзоскелет-ИМК у пациентов с постинсультным парезом в руке. Результаты настоящего исследования могут быть обобщены применением технологии экзоскелет-ИМК с парадигмой воображения движения в качестве методики выбора в нейрореабилитации пациентов с грубыми двигательными нарушениями в кисти.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 13-04-12034-офим и 13-04-12019-офим и РНИМУ им. Н.И. Пирогова (договор № 0373100108213000320\_45551 и контракт № 343-ОК-14).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nicolas-Alonso L.F., Gomez-Gil J.* Brain computer interfaces, a review // *Sensors* (Basel). 2012. V. 12(2). P. 1211.
2. *Daly J.J., Wolpaw J.R.* Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation // *Lancet Neurol.* 2008. V. 7(11). P. 1032.
3. *Мокиенко О.А., Черникова Л.А., Фролов А.А.* Интерфейс мозг–компьютер как новая технология нейрореабилитации // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2011. Т. 5. № 3. С. 46.
4. *Vidal J.J.* Toward direct brain-computer communication // *Ann. Rev. Biophys. Bioeng.* 1973. V. 2. P. 157.
5. *Pfurtscheller G., Aranibar A.* Evaluation of event-related desynchronization (ERD) preceding and following voluntary self-paced movement // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1979. V. 46(2). P. 138.
6. *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. V. 12(3). P. 177.
7. *Héту S., Grégoire M., Saimpont A. et al.* The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2013. V. 37(5). P. 930.
8. *Shih J.J., Krusienski D.J., Wolpaw J.R.* Brain-computer interfaces in medicine // *Mayo Clin. Proc.* 2012. V. 87(3). P. 268.
9. *Mokienko O.A., Chervyakov A.V., Kulikova S. et al.* Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects // *Front. Comput. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 168.
10. *Soekadar S.R., Soekadar S.R., Birbaumer N. et al.* Brain-machine interfaces in neurorehabilitation of stroke // *Neurobiol. Dis.* 2014. doi: 10.1016/j.nbd.2014.11.025
11. *Langhorne P., Bernhardt J., Kwakkel G.* Stroke rehabilitation // *Lancet.* 2011. V. 377. Iss. 9778. P. 1693.
12. *Chiew M., LaConte S., Graham S.* Investigation of fMRI neurofeedback of differential primary motor cortex activity using kinesthetic motor imagery // *NeuroImage.* 2012. V. 61. P. 21.
13. *Черникова Л.А.* Роботизированные системы в нейрореабилитации // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2009. Т. 3. № 3. С. 30.
14. *Сидякина И.В., Шаповаленко Т.В., Лядов К.В.* Механизмы нейропластичности и реабилитация в острейшем периоде инсульта // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии.* 2013. Т. 7. № 1. С. 52.
15. *Kohavi R., Provost F.* Glossary of terms // *Machine Learning – Special Issue of Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process.* 1998. V. 30. P. 271.

16. *Buch E., Weber C., Cohen L.G. et al.* Think to move: a neuromagnetic brain-computer interface (BCI) system for chronic stroke // *Stroke*. 2008. V. 39(3). P. 910.
17. *Buch E.R., Modir Shanechi A., Fourkas A.D. et al.* Parietofrontal integrity determines neural modulation associated with grasping imagery after stroke // *Brain*. 2012. V. 135(Pt 2). P. 596.
18. *Фролов А.А., Гусек Г., Бобров П.Д. и др.* Локализация источников электрической и фокусов гемодинамической активности мозга при воображении движений // *Физиология человека*. 2014. Т. 40(3). С. 44.
19. *Ang K.K., Chua K.S., Phua K.S. et al.* A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke // *Clin. EEG Neurosci*. 2014, 1550059414522229, first published on April 21 DOI: 10.1177/1550059414522229

## **Brain–Computer Interface: the First Clinical Experience in Russia**

**O. A. Mokienko, R. Kh. Lyukmanov, L. A. Chernikova, N. A. Suponeva,  
M. A. Piradov, A. A. Frolov**

*E-mail: xarisovich@gmail.com*

Motor imagery is suggested to stimulate the same plastic mechanisms in the brain as a real movement. The brain–computer interface (BCI) controls motor imagery by converting EEG during this process into the commands for an external device. This article presents the results of two-stage study of the clinical use of non-invasive BCI in the rehabilitation of patients with severe hemiparesis caused by focal brain damage. It was found that the ability to control BCI did not depend on the duration of a disease, brain lesion localization and the degree of neurological deficit. The first step of the study involved 36 patients; it showed that the efficacy of rehabilitation was higher in the group with the use of BCI (the score on the Action Research Arm Test (ARAT) improved from 1 [0; 2] to 5 [0; 16] points,  $p = 0.012$ ; no significant improvement was observed in control group). The second step of the study involved 19 patients; the complex BCI-exoskeleton (i.e. with the kinesthetic feedback) was used for motor imagery trainings. The improvement of the motor function of hands was proved by ARAT (the score improved from 2 [0; 37] to 4 [1; 45.5] points,  $p = 0.005$ ) and Fugl–Meyer scale (from 72 [63; 110] to 79 [68; 115] points,  $p = 0.005$ ).

*Keywords:* motor imagery, hemiparesis, neurorehabilitation, brain–computer interface, exoskeleton.