



Применение комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет» и техники воображения движения для реабилитации после инсульта

Котов С.В. • Турбина Л.Г. • Бобров П.Д. • Фролов А.А. • Павлова О.Г. • Курганская М.Е. • Бирюкова Е.В.

Котов Сергей Викторович – д-р мед. наук, профессор, руководитель неврологического отделения, заведующий кафедрой неврологии факультета усовершенствования врачей¹

✉ 129110, г. Москва, ул. Щепкина, 61/2–10, Российская Федерация.
Тел.: +7 (495) 631 73 62.
E-mail: kotovsv@yandex.ru

Турбина Лидия Григорьевна – д-р мед. наук, профессор, профессор кафедры неврологии факультета усовершенствования врачей¹

Бобров Павел Дмитриевич – канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения²

Фролов Александр Алексеевич – д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией математической нейробиологии обучения²

Павлова Ольга Геннадиевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения²

Курганская Марина Евгеньевна – канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения²

Бирюкова Елена Владимировна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории математической нейробиологии обучения^{2,3}

Актуальность. Эффективность физических упражнений и воображения движений для восстановления двигательных нарушений после инсульта считается доказанной. Однако применение воображения движений осложняется невозможностью объективного и субъективного контроля за выполнением упражнений, а также отсутствием их двигательного подкрепления. Интерфейс «мозг – компьютер» на основе электроэнцефалограммы – метод, позволяющий осуществлять обратную связь при выполнении воображения движений.

Материал и методы. Обследованы 10 пациентов (6 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 30 до 66 лет (средний возраст $47 \pm 7,7$ года), перенесших ишемический ($n=9$) и геморрагический ($n=1$) инсульт в срок от 2 месяцев до 4 лет. Онлайн-распознавание воображения движений осуществлялось классификатором с помощью интерфейса «мозг – компьютер». Экзоскелет осуществлял пассивное движение в паретичной кисти под управлением интерфейса «мозг – компьютер». Пациенты получали по 10 занятий длительностью 45–90 минут в течение 2 недель. В качестве контроля использовали данные 5 пациентов, перенесших инсульт, которым в дополнение к стандартной терапии проводилась имитация реабилитационной процедуры без воображения движения и обратной связи.

Для оценки эффективности проводимых мероприятий использовали модифицированную шкалу Ашворта, шкалу Fugl-Meyer, тест исследования

функций руки ARAT, Британскую шкалу оценки мышечной силы MRC-SS; уровень дееспособности и повседневной активности определяли при помощи модифицированной шкалы Рэнкина и индекса Бартел; когнитивные функции исследовали с использованием таблиц Шульте.

Результаты. Онлайн-распознавание воображения движений по реакции десинхронизации μ -ритма зарегистрировано у пациентов в 50–75%. Субъективно все пациенты отметили улучшение двигательных функций и дееспособности. Положительный результат по данным одного и более показателей был отмечен у всех пациентов, однако статистически значимого различия показателей до и после проведения реабилитационных мероприятий не получено за исключением когнитивной сферы (степень встраиваемости, $p < 0,02$).

Заключение. У пациентов, перенесших инсульт, процедура с использованием воображения движений, интерфейса «мозг – компьютер» и экзоскелета не оказывала отрицательного влияния на процесс реабилитации. Во всех наблюдениях был достигнут положительный результат как в отношении восстановления движений, так и дееспособности и повседневной активности. Результат применения реабилитационной процедуры перспективен, однако следует продолжить исследование.

Ключевые слова: инсульт, парез руки, реабилитация, интерфейс «мозг – компьютер», экзоскелет.

¹ ГБУЗ МО «Московский областной научно-исследовательский клинический институт им. М.Ф. Владимирского»; 129110, г. Москва, ул. Щепкина, 61/2, Российская Федерация

² ФГБУН «Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН»; 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, 5А, Российская Федерация

³ ГБОУ ВПО «Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; 117997, г. Москва, ул. Островитянова, 1, Российская Федерация

Инсульт – ведущая неврологическая причина инвалидизации и смертности. Во всем мире идут активные исследования, направленные на совершенствование диагностических и лечебных подходов при инсульте, особенно это касается применения высокотехнологических методов, используемых для восстановления двигательного и когнитивного неврологического дефицита, нарушающих качество жизни и трудоспособность [1, 2, 3].

Если в остром периоде инсульта функциональное восстановление происходит в результате ротормаживания частично поврежденных участков мозга и возобновления их деятельности, то в дальнейшем в реабилитационном процессе участвуют механизмы нейропластичности. При этом под термином «нейропластичность» подразумевают различные механизмы – замещение (изменение локализации представительства функции в коре), пластичность (способность к перестройке), компенсацию (вовлечение дополнительных моторных корковых зон), реорганизацию и др. [4, 5].

Данные нейрофизиологических исследований свидетельствуют: для включения механизмов нейропластичности, обеспечивающих функциональное восстановление после инсульта, требуется значительное количество практических упражнений [6, 7]. Однако это необходимое условие зачастую не выполняется, и пациенты осуществляют лишь ограниченное число повторений движения при традиционных кинезотерапевтических занятиях. В последние годы для увеличения объема и интенсивности упражнений предлагаются новые методические подходы, использующие виртуальную реальность [8, 9], роботизированную механотерапию [10] и интерфейс «мозг – компьютер» [11, 12].

Интерфейс «мозг – компьютер» устанавливает прямое функциональное взаимодействие между мозгом человека и внешним устройством. Исследования позволили выявить корреляции между психическими процессами и сигналами головного мозга, которые возможно зарегистрировать с помощью электроэнцефалографии. В последние годы получены практические результаты реализации этого направления, растет интерес использования интерфейса «мозг – компьютер» в медицине, в частности, в протезировании нарушенных двигательных функций. Тем не менее вопрос о возможности использования этой методики для реабилитации продолжает активно обсуждаться [13, 14].

Цель исследования – изучить возможность использования интерфейса «мозг – компьютер» для реабилитации двигательных функций у больных с постинсультным парезом верхней конечности.

Материал и методы

Исследование проводилось на базе неврологического отделения ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского сотрудниками клиники неврологии ГБУЗ МО МОНИКИ им. М.Ф. Владимирского, ФГБУН ИВНД и НФ РАН, ГБОУ ВПО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России в 2014 г. В исследование были включены 10 пациентов (6 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 30 до 66 лет (средний возраст $47 \pm 7,7$ года), перенесших ишемический ($n=9$) и геморрагический ($n=1$) инсульт в срок от 2 месяцев до 4 лет. Наблюдавшиеся пациенты находились в раннем ($n=4$), позднем восстановительном периоде ($n=5$) и периоде последствий инсульта ($n=1$).

Неврологическое обследование пациентов проводили по общепринятой схеме в динамике, до и после курса занятий. Силу мышц конечностей измеряли по Британской шкале оценки мышечной силы (Medical Research Council Weakness Scale sums core – MRC-SS), где значение «0 баллов» соответствовало пlegии, «5 баллов» означало 100% соответствия силы мышц в пораженной и здоровой конечностях. Выраженность спастичности в мышцах конечностей оценивали с помощью модифицированной шкалы Ашворта (Modified Ashworth Scale – MAS); клиническая оценка мышечного тонуса в 4 балла служила критерием исключения из исследования [15]. При изучении двигательной и чувствительной функции верхней конечности использовали шкалу Fugl-Meyer [16]. Двигательную функцию руки оценивали также с помощью теста исследования функций руки (Action Research Arm Test – ARAT) [17]. Уровень дееспособности определяли по модифицированной шкале Рэнкина (modified Rankin Scale), повседневной активности – по шкале Бартел (Barthel Activities of Daily Living Index) [18]. Когнитивные функции изучали с использованием таблиц Шульте, при этом рассчитывали такие показатели, как эффективность работы, степень вработываемости и психическая устойчивость.

Для оценки локализации и размера постинсультного дефекта проводили нейровизуализационное исследование на магнитно-резонансном томографе Initial Achieva 3.0T (Philips Medical System Nederland B.V., Нидерланды) с напряженностью магнитного поля 3 Тл. Протокол исследования предполагал получение T1-, T2- и T2*-взвешенных изображений с использованием импульсных последовательностей TSE (TurboSPINEcho), FFE (Fastfieldecho), GraSE (GradientSPINEcho).

При проведении реабилитационных занятий использовали биоинженерный комплекс

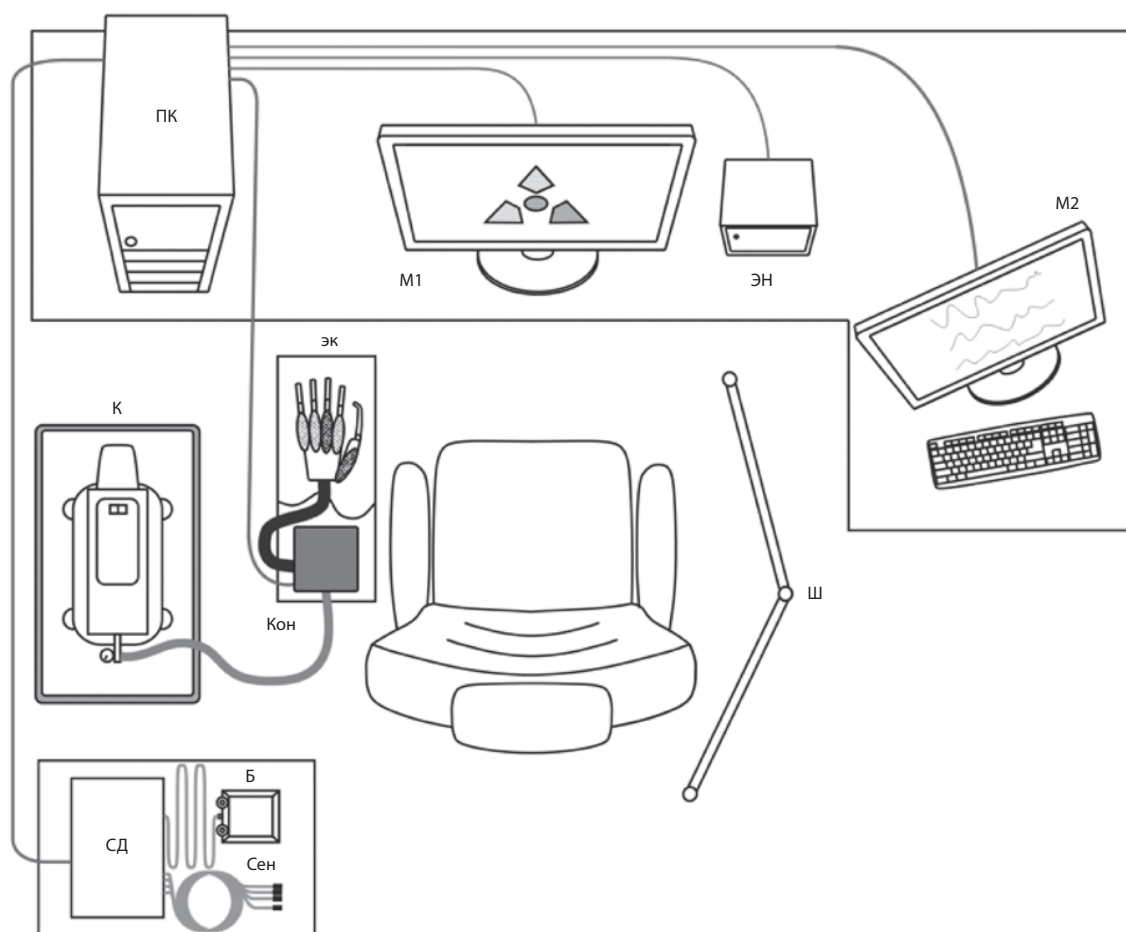


Рис. 1. Схема проведения реабилитационной процедуры с использованием комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет». М1 – монитор для предъявления инструкций, М2 – монитор для контроля хода процедуры и наблюдения за электроэнцефалограммой, ПК – управляющий компьютер, ЭН – электроэнцефалограф, ЭК – экзоскелет кисти на подкатном столике, Кон – блок с пневмоконтроллером экзоскелета, К – компрессор, СД – система регистрации движений, Б – база системы регистрации движений, Сен – сенсоры системы регистрации движений, Ш – ширма

«интерфейс «мозг – компьютер»», включающий в себя:

1) электроэнцефалографическую шапочку с системой 32 активных электродов ActiCap фирмы Brain Products (Германия) для регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ);

2) энцефалографический аналого-цифровой преобразователь NVX52 производства ООО «Нейроботикс»;

3) персональный компьютер с программным обеспечением для синхронной передачи данных, распознавания и классификации сигналов ЭЭГ и формирования управляющей команды в реальном времени;

4) экзоскелет кисти производства ООО «Нейроботикс», состоящий из пяти пальцев, каждый из которых управляется независимыми пневмомышцами.

Реабилитационные занятия у всех пациентов проводились в дневные часы при естественном освещении в изолированном помещении без дополнительной шумоизоляции, причем схема

занятий сохранялась неизменной у всех обследованных. На голову пациента надевалась шапочка с электродами для регистрации ЭЭГ, а на кисти паретичной руки фиксировался экзоскелет (устройство, представляющее собой полимерный подвижный каркас для кисти и пальцев руки с роботизированным пневматическим управлением, предназначенный для разгибания пальцев кисти в объеме, не превышающем физиологический). Отведение биоэлектрической активности головного мозга выполняли 32 электродами, наложенными по системе «10–20». В течение всего занятия осуществлялся мониторинг ЭЭГ (рис. 1).

Пациент располагался в кресле перед монитором компьютера. На экране монитора был изображен круг для фиксации взгляда пациента во время занятия и три стрелки для обозначения инструкций: 1) расслабиться, 2) вообразить активное медленное разгибание пальцев правой кисти, 3) вообразить активное медленное разгибание пальцев левой кисти. Инструкции по воображению движения пациенту предъявлялись в случайном

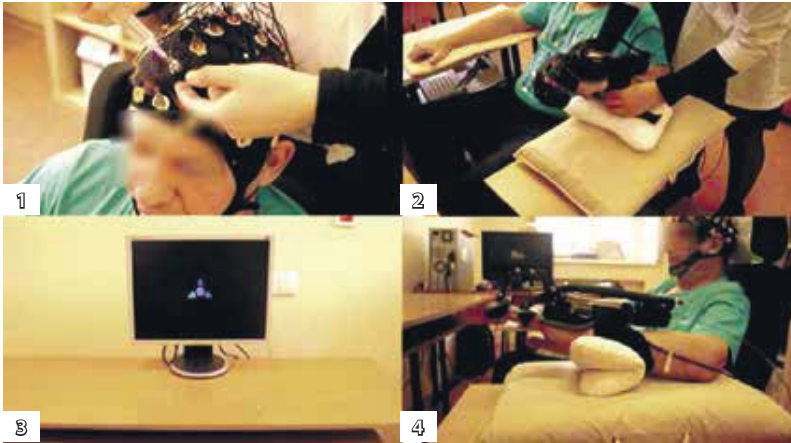


Рис. 2. Порядок выполнения реабилитационной процедуры с использованием комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет»: 1 – установка электродов на голове пациента перед началом реабилитационной процедуры; 2 – фиксация экзоскелета на паретичной кисти пациента; 3 – демонстрация команды вообразить движение левой рукой; 4 – разгибание пальцев кисти паретичной руки при правильном распознавании воображаемого движения

порядке, каждая – в течение 10 секунд, при этом между инструкциями по воображению движения давалось указание на 10-секундный период покоя. Результаты распознавания воображения движения предьявлялись пациенту по зрительной и кинестетической обратной связи: в случае успешного распознавания классификатором задачи, соответствующей предьявляемой инструкции, фиксирующая взор метка в середине экрана приобретала зеленый цвет, а экзоскелет осуществлял пассивное разгибание пальцев кисти. В случае невозможности распознавания воображаемого движения по результатам анализа ЭЭГ цвет метки не изменялся, и экзоскелет не осуществлял движение (рис. 2).

Каждое занятие по воображению движений состояло из 3–5 сессий продолжительностью 10 минут в зависимости от самочувствия и состояния пациента с периодами отдыха не менее 5 минут. Во

время процедуры проводили мониторинг числа сердечных сокращений, артериального давления и контроль насыщения крови кислородом с помощью пульсоксиметра. Каждый пациент получал по 10 занятий длительностью 45–90 минут в течение 2 недель.

Контрольную группу составили 5 пациентов, перенесших инсульт, которым в дополнение к стандартной терапии проводилась имитация реабилитационной процедуры без воображения движения и обратной связи.

Результаты

Все 10 пациентов находились в ясном сознании, были правильно ориентированы в месте и времени. Из обследованных 4 перенесли инсульт в бассейне левой средней мозговой артерии, 6 – в правой. У больных с очагом в левом полушарии имелись речевые нарушения в виде корковой дизартрии ($n = 1$), элементов моторной афазии ($n = 3$) с сохраненной внутренней речью. При логопедическом тестировании были исключены наличие акустико-гностической, акустико-мнестической или семантической афазии, что могло препятствовать правильному пониманию пациентом инструкций по выполнению реабилитационной процедуры.

Все пациенты имели спастический гемипарез выраженностью от 1 до 4 баллов, причиной которого был перенесенный инсульт. При нейровизуализации у всех пациентов обнаруживались обширные постинсультные дефекты вещества мозга, причем у 8 больных выявлялось поражение первичной сенсомоторной и премоторной зон коры полушария головного мозга, а также прилегающего белого вещества головного мозга, у 7 – подкорковое поражение различного объема, локализованное в лобно-теменно-височной области с вовлечением волокон пирамидного тракта.

Таблица 1. Показатели функции верхней конечности у больных, перенесших инсульт, до и после курса тренировок с использованием программно-аппаратного комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет»

Показатель	Основная группа		Контрольная группа	
	исходно	после курса реабилитации	исходно	после курса реабилитации
Сила мышц по MRC-SS	2,7±0,3	3,2±0,3	2,8±0,5	3,4±0,5
Уровень спастичности мышц по шкале Ашворта	1,9±0,2	2,0±0,2	2,4±0,3	2,2±0,3
Функция кисти по шкале ARAT	24,7±5,1	29,4±5,6	23,6±6,1	30,4±10,0
Функция верхней конечности по шкале Fugl-Meyer	81,3±5,2	90,3±6,0	80,2±1,7	84,4±6,0

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ($\pm m$)



Таблица 2. Результаты исследования когнитивных функций пациентов, прошедших тренировку с использованием программно-аппаратного комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет», в сравнении с контрольной группой

Показатель	Основная группа		Контрольная группа	
	исходно	после курса реабилитации	исходно	после курса реабилитации
Эффективность работы	52,6 ± 5,7	52,7 ± 9,6	55,4 ± 3,7	55 ± 5,4
Степень вработываемости	1,15 ± 0,06	0,9 ± 0,04*	1,06 ± 0,08	0,98 ± 0,08
Психическая устойчивость	1,05 ± 0,04	1,01 ± 0,03	0,98 ± 0,07	1,04 ± 0,08

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ($\pm m$)

*Различия достигли уровня статистической значимости – $p < 0,02$

Таблица 3. Результаты исследования уровня дееспособности и повседневной активности пациентов, перенесших инсульт

Показатель	Основная группа		Контрольная группа	
	исходно	после курса реабилитации	исходно	после курса реабилитации
Модифицированная шкала Рэнкина	2,5 ± 0,3	2,0 ± 0,3	2,4 ± 0,3	2,2 ± 0,3
Индекс Бартел	93,0 ± 2,2	99,4 ± 0,5	98,2 ± 1,2	99,8 ± 0,3

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ($\pm m$)

После завершения курса реабилитационных мероприятий все пациенты отметили улучшение двигательных функций и дееспособности.

Анализ показателей функции верхней конечности у пациентов, перенесших инсульт, позволил установить, что в результате проведенного лечения как в основной, так и в контрольной группах увеличилась сила верхней конечности и улучшилась ее функция, при этом оценка по шкале Fugl-Meyer в основной группе возросла на 11%, в контрольной – на 5,2%. Отметим, что существенного изменения уровня спастичности не зарегистрировано, но у пациентов основной группы этот показатель стал немного выше (табл. 1).

Исследование когнитивных функций с помощью таблиц Шульце выявило статистически значимое улучшение показателя степени вработываемости ($p < 0,02$), что свидетельствовало об ускорении протекания психических процессов. При этом в основной группе отмечено увеличение способности к выполнению интеллектуальных задач на 4%, в то время как в контрольной – ухудшение на 6% (табл. 2).

Наряду с оценкой восстановления функции верхней конечности важным показателем является определение уровня общей двигательной и повседневной активности. В последние годы модифицированная шкала Рэнкина используется в реабилитационных исследованиях как универсальный показатель недееспособности (инвалидации). Как видно из данных табл. 3, у пациентов

основной группы уровень инвалидизации снизился на 20%, контрольной – на 8%. Общая повседневная активность у пациентов основной группы повысилась на 7%, контрольной – на 2%.

Обсуждение и заключение

Наблюдение пациентов основной и контрольной групп продемонстрировало наличие положительных сдвигов по всем параметрам, более выраженные изменения зарегистрированы у пациентов основной группы. Отсутствие статистически значимых межгрупповых различий, возможно, обусловлено малым количеством наблюдений. Для выявления достоверных результатов требуется проведение дальнейших исследований.

При анализе приведенных данных можно также предположить, что использование имитации процедуры «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет» в условиях возможности контакта пациентов основной и контрольной групп приводило

Таблица 4. Показатели восстановления нарушенных функций у больных в восстановительном периоде инсульта, получавших стандартную терапию (n = 10)

Показатель	До лечения	После лечения
Модифицированная шкала Рэнкина	3,1 ± 0,4	2,9 ± 0,4
Индекс Бартел	95,0 ± 1,2	95,4 ± 0,9
Сила мышц по MRC-SS	3,2 ± 0,3	3,3 ± 0,3

Данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ($\pm m$)



к включению неконтролируемого экспериментаторами воображения движений, которое улучшало результаты реабилитации у лиц контрольной группы. Данное предположение подтверждается результатами наблюдения пациентов, получающих только традиционную терапию в соответствии со схемой ведения пациента Территориального фонда обязательного медицинского страхования Московской области № 2.25.263.0.6 «Цереброваскулярные заболевания».

Поскольку пациенты, не участвовавшие в данном исследовании, не проходили процедуру обследования в соответствии с методикой клинического, нейропсихологического и электрофизиологического контроля реабилитационной процедуры с использованием программно-аппаратного

комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет», мы можем привести лишь отдельные показатели (табл. 4). Как видно из представленных данных, результат лечения у больных в позднем восстановительном периоде после инсульта был низким, существенной динамики показателей не зарегистрировано. Несмотря на то что все пациенты субъективно отмечали улучшение, объективные данные свидетельствовали об отсутствии достоверных сдвигов в состоянии. Это служит дополнительным аргументом, подтверждающим целесообразность использования в восстановительном лечении больных после инсульта реабилитационной процедуры с включением программно-аппаратного комплекса «интерфейс «мозг – компьютер» и экзоскелет». ☺

Литература

1. 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 Neuroeng Rehabil.* 2010;7:60.
2. Yoon JA, Koo BI, Shin MJ, Shin YB, Ko HY, Shin YI. Effect of constraint-induced movement therapy and mirror therapy for patients with subacute stroke. *Ann Rehabil Med.* 2014;38(4):458–66.
3. Котов СВ. Новые технологии в диагностике и лечении больных в остром периоде инсульта. *Русский медицинский журнал.* 2014;22(10):712–6.
4. Albert SJ, Kesselring J. Neurorehabilitation. In: Brainin M, Heiss WD, editors. *Textbook of Stroke Medicine.* Cambridge: Cambridge University Press; 2010. p. 283–306.
5. Nichols-Larsen DS, Clark PC, Zeringue A, Greenspan A, Blanton S. Factors influencing stroke survivors' quality of life during subacute recovery. *Stroke.* 2005;36(7):1480–4.
6. Plautz EJ, Milliken GW, Nudo RJ. Effects of repetitive motor training on movement representations in adult squirrel monkeys: role of use versus learning. *Neurobiol Learn Mem.* 2000;74(1):27–55.
7. Kwakkel G. Impact of intensity of practice after stroke: issues for consideration. *Disabil Rehabil.* 2006;28(13–14):823–30.
8. Imam B, Jarus T. Virtual reality rehabilitation from social cognitive and motor learning theoretical perspectives in stroke population. *Rehabil Res Pract.* 2014;2014:594540.
9. Lohse KR, Hilderman CG, Cheung KL, Tatla S, Van der Loos HF. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PLoS One.* 2014;9(3):e93318.
10. Lazaridou A, Astrakas L, Mintzopoulos D, Khanicheh A, Singhal AB, Moskowitz MA, Rosen B, Tzika AA. Diffusion tensor and volumetric magnetic resonance imaging using an MR-compatible hand-induced robotic device suggests training-induced neuroplasticity in patients with chronic stroke. *Int J Mol Med.* 2013;32(5):995–1000.
11. Котов СВ, Турбина ЛГ, Бобров ПД, Фролов АА, Павлова ОГ, Курганская МЕ, Бириюкова ЕВ. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса «интерфейс мозг-компьютер + экзоскелет». *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова.* 2014;14(12–2):66–72.
12. Bobrov P, Frolov A, Cantor C, Fedulova I, Bakhnyan M, Zhavoronkov A. Brain-computer interface based on generation of visual images. *PLoS One.* 2011;6(6):e20674.
13. Takahashi M, Takeda K, Otaka Y, Osu R, Hanakawa T, Gouko M, Ito K. Event related desynchronization-modulated functional electrical stimulation system for stroke rehabilitation: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2012;9:56.
14. Faller J, Scherer R, Friedrich EV, Costa U, Opisso E, Medina J, Müller-Putz GR. Non-motor tasks improve adaptive brain-computer interface performance in users with severe motor impairment. *Front Neurosci.* 2014;8:320.
15. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther.* 1987;67(2):206–7.
16. Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Steglind S. The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehabil Med.* 1975;7(1):13–31.
17. Lyle RC. A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research. *Int J Rehabil Res.* 1981;4(4):483–92.
18. Белова АН, ред. Шкалы, тесты и опросники в медицинской реабилитации. М.: Антидор; 2002. 440 с.

References

1. 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 Neuroeng Rehabil.* 2010;7:60.
2. Yoon JA, Koo BI, Shin MJ, Shin YB, Ko HY, Shin YI. Effect of constraint-induced movement therapy and mirror therapy for patients with subacute stroke. *Ann Rehabil Med.* 2014;38(4):458–66.
3. Kotov SV. Novye tekhnologii v diagnostike i lechenii bol'nykh v ostrom periode insul'ta [New technologies in diagnostics and treatment of acute stroke patients]. *Russkiy meditsinskiy zhurnal.* 2014;22(10):712–6 (in Russian).
4. Albert SJ, Kesselring J. Neurorehabilitation. In: Brainin M, Heiss WD, editors. *Textbook of Stroke Medicine.* Cambridge: Cambridge University Press; 2010. p. 283–306.
5. Nichols-Larsen DS, Clark PC, Zeringue A, Greenspan A, Blanton S. Factors influencing stroke survivors' quality of life during subacute recovery. *Stroke.* 2005;36(7):1480–4.
6. Plautz EJ, Milliken GW, Nudo RJ. Effects of repetitive motor training on movement representations in adult squirrel monkeys: role of use versus learning. *Neurobiol Learn Mem.* 2000;74(1):27–55.



7. Kwakkel G. Impact of intensity of practice after stroke: issues for consideration. *Disabil Rehabil.* 2006;28(13–14):823–30.
8. Imam B, Jarus T. Virtual reality rehabilitation from social cognitive and motor learning theoretical perspectives in stroke population. *Rehabil Res Pract.* 2014;2014:594540.
9. Lohse KR, Hilderman CG, Cheung KL, Tatla S, Van der Loos HF. Virtual reality therapy for adults post-stroke: a systematic review and meta-analysis exploring virtual environments and commercial games in therapy. *PLoS One.* 2014;9(3):e93318.
10. Lazaridou A, Astrakas L, Mintzopoulos D, Khanicheh A, Singhal AB, Moskowitz MA, Rosen B, Tzika AA. Diffusion tensor and volumetric magnetic resonance imaging using an MR-compatible hand-induced robotic device suggests training-induced neuroplasticity in patients with chronic stroke. *Int J Mol Med.* 2013;32(5):995–1000.
11. Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaya ME, Biryukova EV. Reabilitatsiya bol'nykh, perenesshikh insul't, s pomoshch'yu bioinzhenernogo kompleksa «interfeys mozg-komp'yuter+ekzoskelet» [Rehabilitation of post stroke patients using a bioengineering system “brain-computer interface + exoskeleton”]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii imeni S.S. Korsakova.* 2014; 14(12–2):66–72 (in Russian).
12. Bobrov P, Frolov A, Cantor C, Fedulova I, Bakhnyan M, Zhavoronkov A. Brain-computer interface based on generation of visual images. *PLoS One.* 2011;6(6):e20674.
13. Takahashi M, Takeda K, Otaka Y, Osu R, Hanakawa T, Gouko M, Ito K. Event related desynchronization-modulated functional electrical stimulation system for stroke rehabilitation: a feasibility study. *J Neuroeng Rehabil.* 2012;9:56.
14. Faller J, Scherer R, Friedrich EV, Costa U, Opisso E, Medina J, Müller-Putz GR. Non-motor tasks improve adaptive brain-computer interface performance in users with severe motor impairment. *Front Neurosci.* 2014;8:320.
15. Bohannon RW, Smith MB. Interrater reliability of a modified Ashworth scale of muscle spasticity. *Phys Ther.* 1987;67(2):206–7.
16. Fugl-Meyer AR, Jääskö L, Leyman I, Olsson S, Stegling S. The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance. *Scand J Rehabil Med.* 1975;7(1):13–31.
17. Lyle RC. A performance test for assessment of upper limb function in physical rehabilitation treatment and research. *Int J Rehabil Res.* 1981;4(4):483–92.
18. Belova AN, editor. *Shkaly, testy i oprosniki v meditsinskoj reabilitatsii* [Scales, tests and questionnaires in medical rehabilitation]. Moscow: Antidor; 2002. 440 p. (in Russian).

The use of a complex “brain-computer interface and exo-skeleton” and movement imagination technique for post-stroke rehabilitation

Kotov S.V. • Turbina L.G. • Bobrov P.D. • Frolov A.A. • Pavlova O.G. • Kurganskaya M.E. • Biryukova E.V.

Background: Efficacy of physical exercise and movement imagination for restoration of motor dysfunction after a stroke is seen as proven. However, the use of movement imagination is complicated by impossibility of objective and subjective control over the exercise, as well as by the absence of their motor support. The brain-computer interface based on electroencephalography is a technique that enables a feedback during movement imagination.

Materials and methods: We assessed 10 patients (6 men and 4 women) aged from 30 to 66 years (mean age, 47 ± 7.7 years) with an ischemic ($n=9$) and hemorrhagic ($n=1$) stroke during the last 2 months to 4 years. Online recognition of movement imagination was done by a classifier with a brain computer interface. An exo-skeleton supported passive movements in a paretic hand managed by the brain-computer interface. During 2 weeks the patients had 10 sessions of 45–90 minute duration each. For control, we used data from 5 stroke patients who, in addition to their standard treatment, underwent an imitation of rehabilitation procedures without movement imagination and feedback.

To assess efficacy of treatment, we used a modified Ashworth scale, Fugl-Meyer scale, test for evaluation

of hand functions ARAT, British scale for assessment of muscle force MRC-SS. Level of everyday activity and working ability was measured with a modified Rankin scale and Bartel index. Cognitive functions were assessed with Schulte tables.

Results: Online recognition of movement imagination according to desynchronization of μ rhythm was registered in 50–75% of patients. All patients reported a subjective improvement of motor functions and working ability. Positive results for at least one parameter were observed in all patients; however, there were no significant difference between the parameters before and after rehabilitation procedures, excluding cognitive functions (degree of warming-up, $p < 0.02$).

Conclusion: In post stroke patients, the use of movement imagination, brain-computer interface and exo-skeleton does not seem to affect the rehabilitation process negatively. In all cases, some positive results were achieved in motor recovery, as well as in working ability and daily activity. The results of the rehabilitation procedure are promising; however, the study should be continued.

Key words: stroke, hand paresis, rehabilitation, brain-computer interface, exo-skeleton.

Kotov Sergey Viktorovich – MD, PhD, Professor; Head of Department of Neurology; Head of Chair of Neurology, Postgraduate Training Faculty¹
✉ 61/2 Shchepkina ul., Moscow, 129110, Russian Federation. Tel.: +7 (495) 631 73 62.
E-mail: kotovsv@yandex.ru

Turbina Lidiya Grigor'evna – MD, PhD, Professor; Chair of Neurology, Postgraduate Training Faculty¹

Bobrov Pavel Dmitrievich – PhD, Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory²

Frolov Aleksandr Alekseevich – PhD, ScD in Biology, Professor; Head of Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory²

Pavlova Ol'ga Gennadiyevna – PhD, Senior Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory²

Kurganskaya Marina Evgen'evna – PhD, Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory²

Biryukova Elena Vladimirovna – PhD, Senior Research Fellow, Mathematical Neurobiology of Learning Laboratory^{2,3}

¹ Moscow Regional Research and Clinical Institute (MONIKI); 61/2 Shchepkina ul., Moscow, 129110, Russian Federation

² Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of Russian Academy of Sciences; 5A Butlerova ul., Moscow, 117485, Russian Federation

³ Pirogov Russian National Research Medical University; 1 Ostrovityanova ul., Moscow, 117997, Russian Federation