

АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СЕНСОМОТОРНОЙ ИНТЕГРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ–КОМПЬЮТЕР»

А. А. Рубакова ✉, Г. Е. Иванова, М. А. Булатова

Федеральный центр мозга и нейротехнологий Федерального медико-биологического агентства, Москва, Россия

Интерфейс «мозг–компьютер» (ИМК) с экзоскелетом кисти руки активирует механизмы нейропластичности, в результате чего происходит моторное научение, однако вклад перцепции в этот процесс на данный момент изучен недостаточно. Целью исследования было изучить влияние сенсомоторной интеграции на эффективность реабилитационного процесса по обучению парадигме движения раскрытия кисти у пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, с помощью ИМК и оценить влияние идеомоторного тренинга на снижение спастичности в паретичной руке. Был проведен анализ данных 58 пациентов (медиана возраста 63 года (22; 83)), с перенесенной черепно-мозговой травмой или инсультом давностью 2 месяца (1,0; 12,0), ишемического (76%) и геморрагического характера (24%), получивших 15 (12; 21) идеомоторных тренировок с использованием ИМК и экзоскелета. Функциональную активность руки оценивали до и после прохождения курса процедур по шкалам Fugl–Meyer, ARAT, Frenchay, FIM, Rivermead, Ashworth. Отмечено увеличение мышечной силы в лучезапястном суставе у 40% пациентов при сгибании-разгибании, у 29% — при отведении-приведении. Увеличение мышечной силы при отведении и приведении лучезапястного сустава происходит одновременно ($p < 0,004$). Назначение идеомоторных тренировок для снижения мышечного тонуса неэффективно, так как достоверно значимого снижения спастичности в кисти выявлено не было. Улучшение в воспроизведении движений кистью паретичной руки положительно коррелировало с улучшением повседневных навыков жизненных активностей. Развитие моторной функции паретичной кисти с помощью экзоскелета ведет к активации кинестетических рецепторов, улучшая чувствительность и мелкую моторику за счет сенсомоторной интеграции.

Ключевые слова: инсульт, идеомоторный тренинг, экзоскелет, интерфейс «мозг–компьютер», нейрореабилитация, сенсомоторная интеграция

Вклад авторов: А. А. Рубакова — сбор, анализ, интерпретация данных, анализ литературы; Г. Е. Иванова — планирование исследования, редактирование рукописи; М. А. Булатова — сбор и анализ данных.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФЦМН ФМБА России (протокол № 33 от 21 июня 2021 г.). Все участники подписали информированное согласие на участие в исследовании.

✉ **Для корреспонденции:** Александра Алексеевна Рубакова
ул. Островитянова, д. 1, стр. 10, г. Москва, 117997, Россия; sandrabiolog@inbox.ru

Статья получена: 26.07.2021 **Статья принята к печати:** 15.08.2021 **Опубликована онлайн:** 01.09.2021

DOI: 10.24075/vrgmu.2021.039

ACTIVATION OF SENSORIMOTOR INTEGRATION PROCESSES WITH A BRAIN-COMPUTER INTERFACE

Rubakova AA ✉, Ivanova GE, Bulatova MA

Federal Center for Brain Research and Neurotechnologies of FMBA, Moscow, Russia

A BCI-controlled hand exoskeleton activates neuroplasticity mechanisms, promoting motor learning. The contribution of perception to this phenomenon is understudied. The aim of this study was to assess the impact of sensorimotor integration on the effectiveness of neurorehabilitation based on the learning of a hand opening movement by stroke patients using BCI and to investigate the effect of ideomotor training on spasticity in the paretic hand. The study was conducted in 58 patients (median age: 63 (22; 83) years) with traumatic brain injury, ischemic (76%) or hemorrhagic (24%) stroke in the preceding 2 (1.0; 12.0) months. The patients received 15 (12; 21) ideomotor training sessions with a BMI-controlled hand exoskeleton. Hand function was assessed before and after rehabilitation on the Fugl–Meyer, ARAT, Frenchay, FIM, Rivermead, and Ashworth scales. An increase in muscle strength was observed in 40% of patients during flexion and extension of the radiocarpal joint and in 29% of patients during the abduction and adduction of the joint. Muscle strength simultaneously increased during the abduction and adduction of the radiocarpal joint ($p < 0.004$). Ideomotor training is ineffective for reducing spasticity because no statistically significant reduction in muscle tone was detected. Improved motor performance of the paretic hand was positively correlated with improvements in daily activities. Motor training of the paretic hand with a robotic orthosis activates kinesthetic receptors, restores sensation and improves fine motor skills through better sensorimotor integration.

Keywords: stroke, ideomotor training, exoskeleton, brain-computer interface, neurorehabilitation, sensorimotor integration

Author contribution: Rubakova AA — data acquisition, analysis, interpretation; literature analysis; Ivanova GE — study design; manuscript editing; Bulatova MA — data acquisition and analysis.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the Federal Center for Brain Research and Neurotechnologies (Protocol № 33 dated June 21, 2021.). Informed consent was obtained from all study participants.

✉ **Correspondence should be addressed:** Alexandra Rubakova
Ostrovityanova, 1, str. 10, Moscow, 117997, Russia; sandrabiolog@inbox.ru

Received: 26.07.2021 **Accepted:** 15.08.2021 **Published online:** 01.09.2021

DOI: 10.24075/brsmu.2021.039

Интеграция сенсорной и моторной информации лежит в основе успешной целенаправленной деятельности и воспроизведения движений, необходимых для взаимодействия с окружающей средой. Нарушение сенсомоторной интеграции превалирует при многих неврологических расстройствах, включая инсульт, развивающийся вследствие широкого ряда причин, в том числе после черепно-мозговой травмы (ЧМТ) [1].

При моторном контроле обратная сенсорная связь во время выполнения движения основана на эффекте копий моторных команд, производимых в мозге. Когда прогноз движения в корковом представительстве совпадает с сенсорной обратной связью, посредством сенсомоторного сравнения у человека создается устойчивый паттерн движения и связанных с ним ощущений [2]. Чувствительность человека к взаимосвязи между

совершенным действием и мгновенными последствиями этого действия, представляемыми в виде перцептивной информации, называют сенсомоторной интеграцией.

Инсульт — одно из наиболее частых заболеваний, ведущих к нарушению сенсомоторной интеграции в результате развития нарушения чувствительности, гемипарезов, спастичности в конечностях, а также гемианопсии, атаксии и апраксии [2]. У большинства пациентов, перенесших инсульт, стойкий парез кисти снижает функциональность движений и общее качество жизни. Современные методы реабилитации основаны на принципах нейропластичности, способствующих моторному научению, которое сосредоточено на восстановлении моторной функции, утраченной из-за пареза, однако вклад перцепции в моторный контроль и обучение часто упускают из виду, и в настоящее время он недостаточно изучен [1]. В психологии развития предполагается, что сенсомоторная интеграция в коре головного мозга является важным фактором обучения [3]. Предполагается, что восстановление навыков движения после инсульта зависит от обучения парадигмам движений [4].

Механизмы нейропластичности, как полагают, основаны на феноменах долговременной потенциации и долговременной депрессии в нейронах головного мозга [5]. В контексте двигательного научения ключевую роль играет первичная моторная кора, в нейронах которой в процессе обучения, причем как в активной фазе научения, так и в периоды отдыха, происходит стимуляция экспрессии специфических генов IEG [5] и синтез нейротрофических факторов, обеспечивающих изменение структур нейрональных сетей и консолидацию полученной информации.

Генерация сенсомоторного μ -ритма, характерного для процессов воображения движения и непосредственного совершения двигательного акта, не только связана с эфферентными процессами и непосредственным движением, но и может происходить и при афферентных влияниях, например, при пассивном разгибании конечности с помощью роботизированного ортеза. Ряд исследований показывает, что тренировка генерации премоторного сенсомоторного ритма является эффективным вмешательством при реабилитации пациентов после инсульта. По результатам клинических испытаний было показано, что тренировка генерации сенсомоторного ритма с замером его амплитуды для контроля роботизированного ортеза с биологической обратной связью (на основании непосредственно движения или его представления) позволяет эффективно восстанавливать двигательную функцию конечностей. Имеются данные, что сочетанная активность сенсорной, моторной коры и коры височной области ассоциирована с проприоцептивной и тактильной афферентацией от двигающейся конечности, что позволяет судить об эффективности тренировки моторных функций пораженной конечности [6].

Двигательное научение на основе принципов нейропластичности также происходит за счет физиологической стимуляции периферических проприоцепторов в результате физических упражнений и сенсомоторной интеграции афферентных и эфферентных сигналов в коре головного мозга. В последнее десятилетие ведутся обширные разработки роботизированных ортезов и реабилитационных комплексов для восстановления пациентов с сенсомоторным дефицитом после повреждения центральной нервной системы [7]. В

инновационных роботизированных реабилитационных модулях использован принцип биологической обратной связи, позволяющий повышать эффективность моторного обучения пациента, однако способности к двигательному научению и факторам, влияющим на него после инсульта, уделено мало внимания [4].

Роботизированные методы реабилитации функции конечностей в клинической практике применяют все чаще. В частности, для верхней конечности изучают эффективность применения роботизированных ортезов, направленных на пассивную и активную тренировку мышц кисти руки, функция которых нарушается при поражении в результате острого нарушения мозгового кровообращения (ОНМК) сенсомоторной коры и/или пирамидных трактов [8]. Только при использовании роботизированных методов реабилитации становится возможной активация механизмов нейропластичности, так как двигательное научение, которое ставится основной целью реабилитационного процесса, требует не менее 400 повторений стереотипного двигательного акта для закрепления паттерна движения в памяти. И долговременную двигательную адаптацию с одновременной коррекцией ошибок по методу биологической обратной связи адекватно обеспечивает лишь использование в реабилитационном процессе интерфейса «мозг-компьютер» [9–12].

Однако для достижения клинически значимых результатов недостаточно одного стереотипного повторения движений. Необходимо сочетание стимулирования зрительного, вестибулярного, проприоцептивного анализаторов, т. е. мультисенсорная стимуляция, а также тренировка когнитивных функций [13]. Известно, что при применении интерфейса «мозг-компьютер» помимо собственно тренировок моторных функций происходит стимуляция интрапсихических процессов [14]. Таким образом, можно предположить, что применение в реабилитационном процессе тренировок с использованием роботизированных ортезов у пациентов с гемипарезами после ОНМК является эффективным инструментом для активации процессов сенсомоторной интеграции, играющих ведущую роль.

В наши задачи входила проверка гипотезы, высказанной Bertani с соавторами, о том, что хотя работа постинсультных пациентов на экзоскелете для верхней конечности потенцирует активацию механизмов нейропластичности в пораженном полушарии, на снижение мышечного тонуса в паретичных конечностях данный метод не оказывает никакого значимого влияния [13]. Проверка данной гипотезы была необходима в связи с тем, что в клинической практике врачи-реабилитологи часто назначают пациентам идеомоторные тренировки с БОС с целью снижения спастичности, таким образом, существует необходимость проверить целесообразность таких назначений для повышения эффективности реабилитационных вмешательств.

Целью исследования было оценить с помощью ИМК влияние процессов сенсомоторной интеграции на эффективность обучения парадигме движения раскрытия кисти у пациентов, перенесших ОНМК, и изучить влияние идеомоторного тренинга на снижение спастичности в паретичной руке.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на базе Федерального центра мозга и нейротехнологий в период с 19.12.2019 по 08.10.2020. В исследовании принимали участие 58

Таблица 1. Оценка изменения мышечной силы до и после идеомоторного тренинга «Экзокисть-2» по парному *t*-критерию Стьюдента

	Значение парного <i>t</i> -критерия Стьюдента	Значимость изменения признака	Среднее значение признака до эксперимента	Среднее значение признака после эксперимента
Сгибание лучезапястного сустава	4,752	Изменения значимы	2,556 ± 1,513	2,963 ± 1,601
Разгибание лучезапястного сустава	5,442	Изменения значимы	2,286 ± 1,581	2,786 ± 1,615
Отведение лучезапястного сустава	4,828	Изменения значимы	2,143 ± 1,689	2,5 ± 1,809
Приведение лучезапястного сустава	4,828	Изменения значимы	2,143 ± 1,689	2,5 ± 1,809
Сгибание в пястно-фаланговых суставах	4,529	Изменения значимы	2,714 ± 1,398	3,018 ± 1,433
Разгибание в пястно-фаланговых суставах	4,56	Изменения значимы	2,054 ± 1,71	2,518 ± 1,748
Оппозиция 1-го пальца	4,511	Изменения значимы	1,893 ± 1,734	2,286 ± 1,806
Оппозиция 5-го пальца	4,328	Изменения значимы	1,768 ± 1,789	2,143 ± 1,873

Примечание: данные представлены как среднее значение (M) и стандартная ошибка среднего ($\pm m$).

пациентов. В исследуемой группе преобладали пациенты мужского пола (42 мужчины, 16 женщин), средний возраст в исследуемой группе составил $62,5 \pm 5$ лет (самому молодому участнику исследования было 22 года, самому пожилому — 83 года). Средняя давность инсульта в исследуемой группе составила 2 месяца, таким образом, 80% пациентов находились в раннем восстановительном периоде (от 1 до 6 месяцев после перенесенного ОНМК), 20% — в позднем восстановительном периоде. Все испытуемые, по данным Эдинбургского опросника, оценки мануальной симметрии в качестве ведущей руки использовали правую.

Реабилитацию после ишемического инсульта проходили 76% пациентов (44 человека), после геморрагического инсульта — 15,5% (9 человек), после ишемического инсульта с геморрагическим пропитыванием — 5% (3 человека) и после черепно-мозговой травмы — 3,5% пациентов (2 человека).

В исследуемой группе преобладали больные с подкорковыми поражениями. По локализации поражения сосудов головного мозга преобладали пациенты с расположением очага поражения в бассейне правой (20 человек; 35,7%) или левой (17 человек; 30,3%) средней мозговой артерии.

По данным первичного осмотра невролога у 93% испытуемых была сохранна глубокая чувствительность, поверхностная чувствительность же была сохранна у 48% пациентов (у 52% исследуемых наблюдалась поверхностная гемигипестезия, контралатеральная стороне поражения головного мозга), причем у 98% пациентов поверхностная гемигипестезия была тотальной, т. е. нарушения затрагивали и болевую, и температурную, и тактильную чувствительность. Глубокая чувствительность была нарушена у 11 пациентов (19%).

Критерии включения пациентов в исследование: сохранность когнитивных функций (не менее 12 баллов по Монреальской шкале оценки когнитивных функций); отсутствие афазии грубой степени, исключая понимание пациентом инструкций к выполнению идеомоторной тренировки; отсутствие грубых нарушений зрения; спастичность в паретичной кисти не более 4 баллов по модифицированной шкале Ashworth; степень инвалидизации не более 3 баллов по шкале Рэнкина; отсутствие контрактур в мышцах руки; отсутствие выраженного болевого синдрома, препятствующего

выполнению идеомоторной тренировки; наличие информированного согласия пациента или его законного представителя на участие в исследовании.

Критерии исключения пациентов из исследования: неспособность выполнять необходимые процедуры, отказ пациента или его законного представителя от участия в исследовании; афазия в степени, исключая понимание инструкций пациентом; грубое нарушение зрения, не позволяющее следовать визуальным инструкциям на экране компьютера; спастичность в кисти 5 баллов по модифицированной шкале Ashworth; степень инвалидизации более 3 баллов по шкале Рэнкина; наличие контрактур в мышцах кисти, выраженный болевой синдром.

По результатам осмотра нейропсихолога в исследуемой группе пациентов средний коэффициент по Монреальской шкале оценки когнитивных функций (MoCA) составил 25,4 балла, причем у 75% пациентов коэффициент MoCA находился в пределах 23–26 баллов.

Реабилитационные вмешательства проводили при помощи комплекса с биологической обратной связью «Экзокисть-2». Используемый метод имеет в основе две теории подхода к роботизированной реабилитации функций верхней конечности после инсульта: 1) нейрофизиологический подход, основанный на теории о нейропластичности и компенсаторных возможностях головного мозга; 2) подход обучения пациента движению, осуществляемый при помощи ориентированной на цель активной тренировки паретичной руки, а также за счет представления движения с мультисенсорной биологической обратной связью. В реабилитационном комплексе «Экзокисть-2» используется мультимодальная (преимущественно зрительная и проприоцептивная) биологическая обратная связь на регистрируемое намерение произвести движение.

Для проведения процедур использовали стандартизированный на 2020 г. протокол и интерфейс «мозг-компьютер» с экзоскелетами обеих кистей рук «Экзокисть-2» («Андроидная техника»; Россия). Взаимодействие между пациентом и реабилитационным модулем было основано на принципах биологической обратной связи.

Пациент садился в медицинское кресло. Его руки помещали в экзоскелеты кистей, закрепленные на подлокотниках кресла. На расстоянии 1 м перед

Таблица 2. Оценка улучшения сенсомоторной активности кисти и функциональной независимости у пациентов, прошедших курс идеомоторных тренировок на комплексе «Экзокисть-2»

	Число пациентов с улучшениями, %	Значение парного <i>t</i> -критерия Стьюдента	<i>p</i> -уровень значимости
Шкала Фугл-Мейера	62%	5,719	<i>p</i> = 0,0
Шкала ARAT	38%	3,236	<i>p</i> = 0,002
Модифицированный тест для руки Frenchay	26%	3,454	<i>p</i> = 0,001
Модифицированная шкала Рэнкина	21%	3,667	<i>p</i> = 0,001
Шкала повседневных жизненных активностей Ривермид	58,60%	4,691	<i>p</i> = 0,0
Шкала функциональной независимости FIM	60,30%	5,028	<i>p</i> = 0,0
Модифицированная шкала Ashworth	14%	-2,634	<i>p</i> = 0,011

пациентом располагали монитор, на котором находилось изображение-инструкция для фиксации взгляда, а затем подавали устные инструкции по выполнению следующих заданий: кинестетически воображать раскрытие левой или правой кисти (в соответствии с направлением стрелки, изображенной на экране) либо сидеть расслабленно, отвлекшись от кинестетического воображения [13].

В процессе выполнения заданий регистрировали электроэнцефалограмму (ЭЭГ) при помощи прибора NVX52 («Медицинские компьютерные системы»; Россия), входящего в состав комплекса «Экзокисть-2», что позволяло определять, какую задачу пациент выполняет в данный момент. Для регистрации ЭЭГ использовали 32 отведения, расположенные на позициях F3, Fz, F4, Fc5, Fc3, Fc1, Fcz, Fc2, Fc4, Fc6, C5, C3, C1, Cz, C2, C4, C6, Cp5, Cp3, Cp1, Cpz, Cp2, Cp4, Cp6, P3, Pz, P4, Po3, Poz, Po4, O1, O2. Для распознавания выполняемой задачи использовали Байесовский классификатор, основанный на анализе ковариационных матриц ЭЭГ. Результат классификации предъявляли пациенту в виде зрительной и проприоцептивной обратной связи: если система распознавала верное выполнение предложенной задачи, то цвет изображения на экране монитора изменялся с белого на зеленый, одновременно с этим происходило раскрытие экзоскелета кисти [15].

Тренировки на воображение движения проводили в течение 7–9 дней по 2–3 процедуры ежедневно. Длительность каждой процедуры в соответствии с протоколом для взрослых пациентов составляла 9 мин [16]. В среднем каждый пациент получал 15 (12; 21) процедур на реабилитационном комплексе «Экзокисть-2».

Оценку эффективности идеомоторного тренинга на ИМК «Экзоскелет-2» проводили при помощи шкал для оценки функционально значимых в повседневной жизни движений. Кроме того, сравнивали результаты первичного и выписного осмотров врача-невролога. Среди применяемых инструментов оценки были модифицированная шкала Ashworth, шкала Фугл-Майера, шкала ARAT, шкала Frenchay, шкала Рэнкина, а также шкалы активностей повседневной жизни Ривермид и FIM.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам анализа клинических данных выявлена прямая корреляция между возрастом пациентов и нарушениями проприоцептивной чувствительности, что было продемонстрировано ранее [17]. При факторном анализе была выявлена статистически значимая корреляция с умеренной теснотой связи по шкале Чеддока между нарушениями глубокой чувствительности

и улучшениями функций кисти по шкалам Фугл-Мейера ($p = 0,32$; $p < 0,02$) и ARAT ($p = 0,454$; $p = 0,0006$).

Идеомоторные тренировки ведут к увеличению мышечной силы в кисти при движениях в лучезапястном и пястно-фаланговых суставах. При сравнении оценки мышечной силы по пятибалльной шкале до прохождения реабилитационных процедур с применением экзоскелета и после прохождения 15 процедур у 23 пациентов (40%) отмечены улучшения при сгибании и разгибании лучезапястного сустава, у 17 пациентов (29%) — улучшения в отведении и приведении лучезапястного сустава. Кроме того, было выявлено, что увеличение мышечной силы при отведении и при приведении лучезапястного сустава происходит одновременно, это может быть связано с нормализацией сенсомоторной интеграции за счет нейропластичности и активации рецепторов мышц кисти. Статистический анализ увеличения мышечной силы до и после идеомоторного тренинга представлен в табл. 1.

При оценке функционального статуса исследуемых пациентов на момент выписки из стационара после прохождения реабилитационных процедур на комплексе «Экзокисть-2» по шкале Фугл-Майера улучшение функции кисти отмечено у 63% пациентов, однако клинически значимые улучшения (на 5 и более баллов) были выявлены лишь у 26% исследуемых.

Улучшения функциональной активности кисти по данным теста для руки Frenchay произошли у 26% пациентов (15 человек).

Улучшение в произведении функционально значимых движений кистью по шкале ARAT в группе исследуемых было статистически значимым и наступило у 38% пациентов, однако значения показателей улучшения были распределены неравномерно: у 13 пациентов были отмечены улучшения в диапазоне 2–7 баллов, у 9 пациентов — в диапазоне 17–55 баллов. Следует заметить, что улучшения произошли преимущественно у тех пациентов, которые при госпитализации имели более 0 баллов по вышеназванной шкале.

Улучшение в воспроизведении движений кистью паретичной руки привело к статистически значимым результатам при исследовании повседневных навыков жизненных активностей по шкалам FIM и Ривермид. Вероятно, это может быть связано с тем, что развитие моторной функции паретичной кисти с помощью экзоскелета ведет к активации кинестетических рецепторов, улучшая мелкую моторику и чувствительность верхней конечности за счет сенсомоторной интеграции. Результаты оценки сенсомоторной активности кисти и функциональной независимости пациентов представлены в табл. 2.

Проверка гипотезы Bertani и соавторов [13] показала, что степень снижения спастичности в паретичной руке при оценке по модифицированной шкале Ashworth была статистически незначимой ($p = 0,001$) и снижение мышечного тонуса наблюдалось лишь у 8 пациентов (14%) из исследуемой группы. Таким образом, механизмы нейропластичности не оказывают значимого влияния на снижение спастичности в паретичной руке.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наблюдение группы пациентов с гемипарезами и неврологическим дефицитом после перенесенного ОНМК, проходивших реабилитацию на роботизированном комплексе «Экзокисть-2», показало статистически значимое улучшение как моторной активности и чувствительности кисти, так и функциональной повседневной активности пациентов. Большинство пациентов после прохождения 15 процедур сообщали об улучшении функций верхней конечности.

Вероятнее всего, у пациентов пожилого возраста не только в связи с перенесенным инсультом, но и по причине возрастной инволюции серого вещества головного мозга была нарушена интеграция между первичной моторной корой и дополнительной моторной корой (шестое поле Бродмана). В результате у пациентов с премоторной апраксией процедуры с использованием ИМК «Экзокисть-2» показали низкую эффективность при оценке по всем использованным шкалам, так как основной задачей идеомоторного тренинга является именно воображение движения, за что отвечает шестое цитоархитектоническое поле Бродмана [17, 18].

Кроме того, на основании литературных данных можно полагать, что у тех пациентов, чьи функции кисти по результатам прохождения идеомоторной тренировки значительно улучшились, на основании механизмов нейропластичности происходит восстановление интеграции между задней париетальной корой, отвечающей за намерение совершить движение, дополнительной моторной корой и первичной моторной корой, отвечающей за непосредственное совершение движения [19]. Таким образом, можно увидеть, как по мере улучшений моторных функций происходит также нормализация сенсомоторной интеграции между зрительной корой, воспринимающей стимулы с инструкциями, предъявляемыми пациенту, теменной долей, играющей ключевую роль в восприятии схемы тела и кинестетической чувствительности, а также париетальной, дорсальной премоторной и моторной корой. В связи с этим все вышеобозначенные области коры головного мозга, а не только пре- и постцентральная извилина, можно назвать в совокупности «сенсомоторной корой», хотя они и разделены пространственно. Именно

сенсомоторная кора генерирует μ -ритм частотой 8–12 Гц, который и является мишенью для регистрации ЭЭГ при работе пациента на комплексе «Экзокисть-2» с целью дальнейшей классификации результата по выполняемой пациентом задаче. Спонтанная десинхронизация (снижение μ -ритма) происходит до и во время непосредственного движения, а спонтанная синхронизация (усиление) — после движения. Механизм генерации этого импульса до сих пор недостаточно изучен, однако имеются данные, что он продуцируется в результате совместной работы премоторной, моторной коры, а также подкорковых и спинальных центров [7, 20].

По результатам анализа полученных данных можно судить о том, что реабилитационные процедуры с применением ИМК приводят к снижению степени инвалидизации больных, оцениваемой по шкале Рэнкин.

Процессы сенсомоторной интеграции, на активацию которых в конечном счете и направлен идеомоторный тренинг, значительно улучшались после курса процедур. Об этом можно судить по полученным клиническим данным, так как функциональная независимость и повседневная активность пациентов напрямую зависят не только от их двигательной активности, но и от точности и скорости поступающей по афферентным волокнам информации от периферических рецепторов. Тренировки на комплексе «Экзокисть-2» не только позволяют развивать моторные функции кисти руки, но и активируют различные системы восприятия: зрительную, кинестетическую, слуховую, — в связи с этим, можно говорить о том, что регулярные мультимодальные тренировки с БОС не только активируют механизмы нейропластичности, но и приводят к консолидации сенсорной информации, полученной при выполнении процедур. Таким образом, происходит взаимодействие слухового, зрительного, кинестетического анализаторов, системы восприятия схемы тела, моторных функций, а также интрапсихических процессов, таких как мотивация и память, что прямо указывает на стимуляцию процессов сенсомоторной интеграции.

ВЫВОДЫ

Снижение неврологического дефицита, выявляемое при анализе клинических данных, а также данные, указывающие на активацию процессов сенсомоторной интеграции после курса идеомоторных тренировок, позволяют судить о том, что реабилитационные процедуры с применением комплекса «Экзокисть-2» эффективны при восстановлении постинсультных больных. В связи с этим можно рекомендовать неинвазивный ИМК с роботизированным ортезом для включения в активную клиническую практику в составе комплексной программы нейрореабилитации после ОНМК.

Литература

1. Edwards LL, King EM, Buetefisch CM, Borich MR. Putting the "Sensory" Into Sensorimotor Control: The Role of Sensorimotor Integration in Goal-Directed Hand Movements After Stroke. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2019; 13: 16. DOI: 10.3389/fnint.2019.00016.
2. Espenhahn S, Rossiter HE, van Wijk BCM, Redman N, Rondina JM, Diedrichsen J, et al. Sensorimotor cortex beta oscillations reflect motor skill learning ability after stroke. *Brain Communications*. 2020; 2 (2): fcaa161. DOI: 10.1093/braincomms/fcaa161.
3. Mahoney JR, Verghese J. Does Cognitive Impairment Influence Visual-Somatosensory Integration and Mobility in Older Adults? *The Journals of Gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*. 2020; 75 (3): 581–8. DOI: 10.1093/gerona/glz117.
4. Jacquey L, Baldassarre G, Santucci VG, O'Regan JK. Sensorimotor Contingencies as a Key Drive of Development: From Babies to Robots. *Frontiers in neurorobotics*. 2019; 13: 98. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00098.
5. Luft AR, Buitrago MM, Ringer T, Dichgans J, Schulz JB. Motor

- skill learning depends on protein synthesis in motor cortex after training. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*. 2004; 24 (29): 6515–20. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1034-04.2004.
6. Hosp JA, Mann S, Wegenast-Braun BM, Calhoun ME, Luft AR. Region and task-specific activation of arc in primary motor cortex of rats following motor skill learning. *Neuroscience*. 2013; 250: 557–64. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.06.060.
 7. Norman SL, McFarland DJ, Miner A, Cramer SC, Wolbrecht ET, Wolpaw JR, Reinkensmeyer DJ. Controlling pre-movement sensorimotor rhythm can improve finger extension after stroke. *Journal of neural engineering*. 2018; 15 (5): 056026. DOI: 10.1088/1741-2552/aad724.
 8. Friedrich J, Verrel J, Kleimaker M, Münchau A, Beste C, Bäumer T. Neurophysiological correlates of perception-action binding in the somatosensory system. *Scientific reports*. 2020; 10 (1): 14794. DOI: 10.1038/s41598-020-71779-0.
 9. Котов С. В., Турбина Л. Г., Бобров П. Д., Фролов А. А., Павлова О. Г., Курганская М. Е., Бирюкова Е. В. Применение комплекса «интерфейс «мозг-компьютер» и экзоскелет» и техники воображения движения для реабилитации после инсульта. *Альманах клинической медицины*. 2015; (39): 15–21. DOI: 10.18786/2072-0505-2015-39-15-21.
 10. Королева Е. С., Алифиорова В. М., Латыпова А. В., Чебан С. В., Отт В. А., Бразовский К. С., и др. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных технологий у пациентов после инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019; 18 (2): 223–33. DOI: 10.20538/1682-0363-2019-2-223-233.
 11. Di Pino G, Pellegrino G, Assenza G, Capone F, Ferreri F, Formica D, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation. *Nat Rev Neurol*. 2014; 10 (10): 597–608. DOI: 10.1038/nrneurol.2014.162.
 12. Nahmani M, Turrigiano GG. Adult cortical plasticity following injury: recapitulation of critical period mechanisms? *Neuroscience*. 2014; 283: 4–16. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2014.04.029.
 13. Bertani R, Melegari C, De Cola MC, Bramanti A, Bramanti P, Calabrò RS. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis. *Neurol Sci*. 2017; 38 (9): 1561–9. DOI: 0.1007/s10072-017-2995-5.
 14. Chivukula S, Jafari M, Aflalo T, Yong NA, Pouratian N. Cognition in Sensorimotor Control: Interfacing With the Posterior Parietal Cortex. *Front Neurosci*. 2019; 13: 140. DOI: 10.3389/fnins.2019.00140.
 15. Frolov A, Husek D, Bobrov PD, Korshakov A, Chernikova L, Kononov R, Mokienko O. Sources of EEG activity most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*. 2012; 22 (1): 21–37. DOI: 10.14311/Nnw.2012.22.002.
 16. Frolov AA, Mokienko O, Lyukmanov R, Biryukova E, Kotov S, Turbina L, et al. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial. *Front Neurosci*. 2017; 11: 400. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400.
 17. Yoshimura N, Tsuda H, Aquino D, Takagi A, Ogata Y, Koike Y, et al. Age-Related Decline of Sensorimotor Integration Influences Resting-State Functional Brain Connectivity. *Brain sciences*. 2020; 10 (12): 966.
 18. Tanji J, Shima K. Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead. *Nature*. 1994; 371 (6496): 413–6. DOI: 0.1038/371413a0.
 19. Mazurek KA, Richardson D, Abraham N, Foxe JJ, Freedman EG. Utilizing High-Density Electroencephalography and Motion Capture Technology to Characterize Sensorimotor Integration While Performing Complex Actions. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 2020; 28 (1): 287–96. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2941574.
 20. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *Neuroeng Rehabil*. 2018; 15 (1): 46. DOI: 10.1186/s12984-018-0383-x.

References

1. Edwards LL, King EM, Buetefisch CM, Borich MR. Putting the "Sensory" Into Sensorimotor Control: The Role of Sensorimotor Integration in Goal-Directed Hand Movements After Stroke. *Frontiers in Integrative Neuroscience*. 2019; 13: 16. DOI: 10.3389/fnint.2019.00016.
2. Espenhahn S, Rossiter HE, van Wijk BCM, Redman N, Rondina JM, Diedrichsen J, et al. Sensorimotor cortex beta oscillations reflect motor skill learning ability after stroke. *Brain Communications*. 2020; 2 (2): fcaa161. DOI: 10.1093/braincomms/fcaa161.
3. Mahoney JR, Verghese J. Does Cognitive Impairment Influence Visual-Somatosensory Integration and Mobility in Older Adults? *The journals of gerontology. Series A, Biological sciences and medical sciences*. 2020; 75 (3): 581–8. DOI: 10.1093/gerona/gz117.
4. Jacquy L, Baldassarre G, Santucci VG, O'Regan JK. Sensorimotor Contingencies as a Key Drive of Development: From Babies to Robots. *Frontiers in neurorobotics*. 2019; 13: 98. DOI: 10.3389/fnbot.2019.00098.
5. Luft AR, Buitrago MM, Ringer T, Dichgans J, Schulz JB. Motor skill learning depends on protein synthesis in motor cortex after training. *The Journal of neuroscience: the official journal of the Society for Neuroscience*. 2004; 24 (29): 6515–20. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1034-04.2004.
6. Hosp JA, Mann S, Wegenast-Braun BM, Calhoun ME, Luft AR. Region and task-specific activation of arc in primary motor cortex of rats following motor skill learning. *Neuroscience*. 2013; 250: 557–64. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2013.06.060.
7. Norman SL, McFarland DJ, Miner A, Cramer SC, Wolbrecht ET, Wolpaw JR, Reinkensmeyer DJ. Controlling pre-movement sensorimotor rhythm can improve finger extension after stroke. *Journal of neural engineering*. 2018; 15 (5): 056026. DOI: 10.1088/1741-2552/aad724.
8. Friedrich J, Verrel J, Kleimaker M, Münchau A, Beste C, Bäumer T. Neurophysiological correlates of perception-action binding in the somatosensory system. *Scientific reports*. 2020; 10 (1): 14794. DOI: 10.1038/s41598-020-71779-0.
9. Котов СВ, Турбина ЛГ, Бобров ПД, Фролов АА, Павлова ОГ, Курганская МЕ, и др. Применение комплекса «интерфейс «мозг-компьютер» и экзоскелет» и техники воображения движения для реабилитации после инсульта. *Альманах клинической медицины*. 2015; (39): 15–21. DOI: 10.18786/2072-0505-2015-39-15-21. Russian.
10. Королева ЕС, Алифиорова ВМ, Латыпова АВ, Чебан СВ, Отт ВА, Бразовский КС, и др. Принципы и опыт применения роботизированных реабилитационных технологий у пациентов после инсульта. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019; 18 (2): 223–33. DOI: 10.20538/1682-0363-2019-2-223-233. Russian.
11. Di Pino G, Pellegrino G, Assenza G, Capone F, Ferreri F, Formica D, et al. Modulation of brain plasticity in stroke: a novel model for neurorehabilitation. *Nat Rev Neurol*. 2014; 10 (10): 597–608. DOI: 10.1038/nrneurol.2014.162.
12. Nahmani M, Turrigiano GG. Adult cortical plasticity following injury: recapitulation of critical period mechanisms? *Neuroscience*. 2014; 283: 4–16. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2014.04.029.
13. Bertani R, Melegari C, De Cola MC, Bramanti A, Bramanti P, Calabrò RS. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis. *Neurol Sci*. 2017; 38 (9): 1561–9. DOI: 0.1007/s10072-017-2995-5.
14. Chivukula S, Jafari M, Aflalo T, Yong NA, Pouratian N. Cognition in Sensorimotor Control: Interfacing With the Posterior Parietal Cortex. *Front Neurosci*. 2019; 13: 140. DOI: 10.3389/fnins.2019.00140.
15. Frolov A, Husek D, Bobrov PD, Korshakov A, Chernikova L, Kononov R, Mokienko O. Sources of EEG activity most relevant to performance of brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*. 2012; 22 (1): 21–37. DOI: 10.14311/Nnw.2012.22.002.

16. Frolov AA, Mokienko O, Lyukmanov R, Biryukova E, Kotov S, Turbina L, et al. Post-stroke Rehabilitation Training with a Motor-Imagery-Based Brain-Computer Interface (BCI)-Controlled Hand Exoskeleton: A Randomized Controlled Multicenter Trial. *Front Neurosci.* 2017; 11: 400. DOI: 10.3389/fnins.2017.00400.
17. Yoshimura N, Tsuda H, Aquino D, Takagi A, Ogata Y, Koike Y, et al. Age-Related Decline of Sensorimotor Integration Influences Resting-State Functional Brain Connectivity. *Brain sciences.* 2020; 10 (12): 966.
18. Tanji J, Shima K. Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead. *Nature.* 1994; 371 (6496): 413–6. DOI: 0.1038/371413a0.
19. Mazurek KA, Richardson D, Abraham N, Foxe JJ, Freedman EG. Utilizing High-Density Electroencephalography and Motion Capture Technology to Characterize Sensorimotor Integration While Performing Complex Actions. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.* 2020; 28 (1): 287–96. DOI: 10.1109/TNSRE.2019.2941574.
20. Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *Neuroeng Rehabil.* 2018; 15 (1): 46. DOI: 10.1186/s12984-018-0383-x.