

# КЛИНИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА

УДК 616.831-005.1:612.821:004.9]-072.8(048.8)

DOI 10.34014/2227-1848-2019-1-8-16

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕРФЕЙСА «МОЗГ-КОМПЬЮТЕР» В РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С МОТОРНЫМИ НАРУШЕНИЯМИ ПОСЛЕ ПЕРЕНЕСЕННОГО ИНСУЛЬТА

Ю.А. Крючков, Н.В. Щуковский, **И.И. Шоломов**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского»  
Минздрава России, г. Саратов, Россия

e-mail: ukfeatxxx@mail.ru

*Острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) занимает одну из лидирующих позиций в структуре заболеваемости, смертности и утраты трудоспособности населения не только в Российской Федерации, но и во всем мире. Двигательные расстройства различной степени выраженности являются частым следствием перенесенного ОНМК. В последнее десятилетие все чаще рассматривается вопрос о внедрении высокотехнологичных аппаратных методов реабилитации в стандарт восстановительных процедур для реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта. Данные методы позволяют максимально активизировать процессы нейропластичности, обеспечить активное участие пациента и высокую интенсивность тренировок в различные восстановительные сроки, снизив нагрузку на медицинский персонал. Использование нейроинтерфейсов по типу «мозг-компьютер» (ИМК) в области реабилитации и улучшения качества жизни больных является перспективным и быстроразвивающимся направлением. В работе описана современная патофизиологическая картина развития двигательных нарушений после перенесенного инсульта, механизмы нейропластичности и влияние на них двигательной реабилитации. Уделяется большое внимание нейроинтерфейсам по типу «мозг-компьютер» как средствам коммуникации между пациентом и техническими устройствами, позволяющим пациенту взаимодействовать с ними при помощи собственных сигналов активности головного мозга, получая обратную связь в виде зрительной или тактильной информации. Представлены современные данные о возможностях применения данной технологии в реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта. Обсуждены результаты проведенных исследований с использованием нейроинтерфейсов по типу «мозг-компьютер». Определена теоретическая и клиническая эффективность данной технологии.*

**Ключевые слова:** нейропластичность, реабилитация, моторные нарушения, перенесенный инсульт, интерфейс «мозг-компьютер».

Острое нарушение мозгового кровообращения (ОНМК) занимает одну из лидирующих позиций в структуре заболеваемости, смертности и утраты трудоспособности населения не только в Российской Федерации, но и во всем мире. Двигательные расстройства различной степени выраженности являются частым следствием перенесенного ОНМК [1, 2]. Моторные нарушения верхней конечности развиваются у 80 % выживших

после инсульта пациентов, у 40 % из них они сохраняются пожизненно [3, 4]. Данный дефицит значительно снижает не только повседневную активность пациентов, но и в совокупности с другими последствиями ОНМК оказывает серьезное влияние на качество жизни больных.

Центральный парез после инсульта возникает как следствие поражения коркового мотонейрона или кортикоспинального тракта

на уровне головного или спинного мозга [5, 6]. Поражение центрального мотонейрона приводит к снижению тормозных влияний на альфа-мотонейроны и на интернейроны, что влечет за собой увеличение числа импульсов и расстройство их возбудимости в ответ на растяжение мышц [7]. Длительное (более одного месяца) сохранение пареза после инсульта приводит к структурным изменениям сегментарного аппарата спинного мозга, в частности к укорочению дендритов альфа-мотонейронов и разрастанию (спрутингу) афферентных волокон [8]. Данные изменения клинически проявляются в виде мышечной слабости в конечностях, спастичности, повышения глубоких и появления патологических рефлексов, потери ловкости и контроля за движениями [9, 10].

Восстановление и компенсация нарушенных функций нервной системы осуществляются в большей степени за счет механизмов нейропластичности. В данных механизмах участвуют не только нейроны и их отростки, но и глиальные элементы, сосудистая система. Кроме того, изменяется функциональная активность синапсов и их количество, протяженность и конфигурация активных зон, происходит формирование новых синапсов [11]. Для активации данных механизмов восстановления у больных после инсульта в рамках медицинской реабилитации проводится двигательная реабилитация. Данный вид реабилитации ставит перед врачом и пациентом следующие цели: насколько возможно раннее начало реабилитационных мероприятий, мульти- и междисциплинарный подход к ней, активное вовлечение пациента в процесс, регулярность и адекватная для пациента нагрузка с одновременным привлечением различных видов восстановительного лечения [12, 13].

К базовым методам лечения двигательных нарушений после перенесенного инсульта относят ЛФК (лечебная гимнастика, пассивная гимнастика, лечебный массаж), эрготерапию и терапию, вызванную ограничением движения (СИТ). Однако в последнее десятилетие все чаще рассматривается вопрос о внедрении высокотехнологичных аппаратных методов реабилитации в стандарт восстано-

вительных процедур. Данные методы позволяют максимально активизировать процессы нейропластичности [14, 15], обеспечить активное участие пациента и высокую интенсивность тренировок в различные восстановительные сроки, снизив нагрузку на медицинский персонал. К ним относят транскраниальную магнитную стимуляцию, аппаратную реабилитацию с применением различных роботизированных и механотерапевтических устройств, технологии виртуальной реальности [16–18].

Все чаще обсуждается применение нейроинтерфейсов по типу «мозг-компьютер» (ИМК) как средства коммуникации между пациентом и техническими устройствами, позволяющего пациенту взаимодействовать с ними при помощи собственных сигналов активности головного мозга, получая обратную связь в виде зрительной или тактильной информации [19, 20]. Ответ может быть представлен в абстрактной форме (например, движущийся курсор на экране компьютера), в форме воплощенной обратной связи (например, визуальные представления частей тела участника над виртуальным аватаром на экране компьютера) или в виде соматосенсорных ощущений через роботизированные, тактильные или нейромышечные системы электрической стимуляции, воспроизводящие предполагаемое движение [21].

Выделяют инвазивные и неинвазивные способы реабилитации с помощью ИМК. В инвазивных электроды расположены на поверхности мозга (электрокортикография) или имплантированы в кору (микроэлектродные матрицы). Данные интерфейсы обладают высокой разрешающей способностью и позволяют не только анализировать активность нейронов, но и локально стимулировать нервную ткань, осуществляя передачу сигналов обратной связи в мозг. Основными недостатками данного типа, помимо значительных финансовых затрат, являются зарастание вживленных микроэлектродов соединительной тканью и риск развития инфекционных осложнений после нейрохирургической операции по вживлению [22].

В неинвазивных ИМК электроды располагают на коже головы.

Контроль над использованием ИМК осуществляется с помощью современной нейрофизиологической аппаратуры. Электрофизиологическая активность мозга может оцениваться методами электроэнцефалографии (ЭЭГ), магнитоэнцефалографии (МЭГ), ближней инфракрасной спектроскопии путем измерения изменения концентрации окисленного и восстановленного гемоглобина (БИРС) [23, 24]. Наиболее распространены неинвазивные ИМК, основанные на регистрации ЭЭГ. Их использование не требует специальных медицинских показаний, кроме того, они дешевы, компактны и транспортабельны. Электромиографическая активность, движения головы и глаз затеяют нейронную активность, что уменьшает точность распознавания и, как следствие, итоговую производительность ИМК. Однако данная технология постоянно совершенствуется, ведутся многочисленные разработки по декодированию и фильтрации сигнала, что может значительно улучшить точность расшифровки данных ЭЭГ [25, 26].

Нейрофизиологические феномены, которые лежат в основе интерпретации намерений человека в неинвазивных ИМК, можно разделить на две группы – эндогенные и экзогенные. В экзогенных ИМК используются естественные реакции мозга на внешние стимулы. К ним относятся ИМК, основанные на анализе вызванных зрительных потенциалов или компонента P300 [27]. Данный компонент возникает через 300 мс после появления неожиданного, редко предъявляемого стимула, имеет положительную амплитуду 5–15 мкВ и длительность около 250–500 мс. P300 не зависит от предъявляемого стимула, а зависит от внимания испытуемого [28]. Эндогенные ИМК основаны на анализе изменений потенциалов и ритмов коры мозга, соответствующих реальной активности пациента или воображаемому движению. Наиболее распространен анализ сенсомоторного ритма (мю-ритма). Данный ритм находится в диапазоне 8–13 Гц и наблюдается в состоянии бодрствования над первичной соматосенсорной и двигательной областями коры при отсутствии сенсорных стимулов и двигательной информации [29, 30]. Выполнение паци-

ентом движения или его воображение приводит к уменьшению мю-ритма в соответствующем корковом представительстве, что также называется десинхронизацией, связанной с событием (event-related desynchronization, ERD). При расслаблении после выполнения движения возникает увеличение ритма, или синхронизация, связанная с событием (event-related synchronization, ERS) [31, 32]. Поскольку соматотопическое расположение верхних и нижних конечностей имеет значительное представительство в коре головного мозга, по локализации мю-ритма можно достаточно точно определить, движение какого исполнительного органа выполняет или воображает испытуемый [33].

ИМК, основанные на анализе ЭЭГ, соответствующие воображению различных движений, продолжают совершенствоваться как за счет улучшения методов распознавания биоэлектрической активности мозга, так и за счет улучшения методов тренировки испытуемых [34, 35]. В 2013 г. группой ученых Тюбингенского университета под руководством Ander Ramos-Murguialday было проведено крупное двойное слепое плацебо-контролируемое исследование по эффективности неинвазивного ИМК с обратной кинестетической связью на пациентах с грубым парезом дистальных отделов руки. В исследование были включены 32 пациента, которых впоследствии случайным образом разделили на 2 группы по 16 чел. Моторные нарушения верхней конечности оценивались по шкале Fugl-Meyer (FM), соответствовали грубому парезу ( $12,2 \pm 1,2$  балла из 66). В основной группе пациенты при помощи ИМК, основанного на десинхронизации сенсомоторных ритмов, управляли ортезом, который осуществлял раскрытие кисти. В контрольной группе работа ортеза производилась в случайном порядке. Помимо тренировок с ИМК, пациенты обеих групп получали идентичную целенаправленную физиотерапию. Для оценки эффективности процедуры применялись двигательная шкала FM и фМРТ до и после курса тренировок с ИМК. По завершении блока тренировок улучшение по шкале FM в основной группе было достоверно больше, чем в группе контроля (разница пока-

зателей в группах составила  $3,410 \pm 0,563$  балла,  $p=0,018$ ), что отразилось в клинически значимом восстановлении паретичных мышц руки. Показатели двигательных шкал коррелировали с данными фМРТ (отмечена активация премоторной и моторной зон коры головного мозга ипсилатерального полушария). Авторы исследования сделали выводы о целесообразности использования ИМК с обратной связью в качестве средства реабилитации, улучшающего двигательные функции руки с выраженным парезом в дистальных отделах [36, 37].

С 2014 г. в России под руководством профессора А.А. Фролова проходит мультицентровое плацебо-контролируемое исследование эффективности применения ИМК с обратной связью у пациентов с парезом в руке после перенесенного инсульта. В 2016 г. были опубликованы предварительные результаты данного исследования. В исследование было включено 74 участника, из них 55 пациентов составляли основную группу и 19 чел. – группу контроля. Применялся ИМК, основанный на анализе ЭЭГ-мониторирования, распознавании реакции десинхронизации сенсорно-моторного ритма. В качестве обратной связи была использована зрительная (метка в центре экрана окрашивалась в зеленый цвет) и кинестетическая связь (экзоскелет производил рас-

крытие кисти при успешном выполнении ментальной тренировки по воображению движения). В качестве экзоскелета использовался экзоскелет кисти, управляемый электромоторами. Пациенты основной группы получали 10 ежедневных тренировок (по 3 сессии в каждой, длительность – 40 мин). Пациенты из группы контроля получали пассивную механотерапию в виде раскрытия экзоскелета паретичной руки в случайном порядке, без воображения движения. Оценка двигательной функции проводилась с помощью шкал FM и ARAT. В основной группе было отмечено достоверное улучшение функции захвата кисти по шкале ARAT и улучшение двигательной функции в проксимальных и дистальных отделах по шкале FM [38–40].

Применение неинвазивных интерфейсов «мозг-компьютер» в реабилитации пациентов с моторными нарушениями после перенесенного инсульта имеет не только теоретическую, но и значительную клиническую эффективность. Однако для повышения степени достоверности доказательств и убедительности рекомендаций по применению требуется проведение дополнительных исследований с изучением эффективности использования данного метода в различных периодах реабилитации, а также в зависимости от локализации очага поражения и когнитивных функций пациента.

## Литература

1. Инсульт у взрослых: центральный парез верхней конечности. М.; 2017. 106.
2. Белова А.Н., Прокопенко С.В. Нейрореабилитация. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Антидор; 2010. 1288.
3. Hatem S.M., Saussez G., Della Faille M., Prist V., Zhang X., Dispa D., Bleyenheuft Y. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in human neuroscience*. 2016; 10: 442.
4. Lawrence E.S., Coshall C., Dundas R., Stewart J., Rudd A.G., Howard R. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population. *Stroke*. 2001; 32 (6): 1279–1284.
5. Bach-Y-Rita P. Theoretical and practical considerations in the restoration of function after stroke. *Top Stroke Rehabilitation*. 2001; 8 (3): 1–15.
6. Bajaj S., Butler A.J., Drake D., Dhamala M. Functional organization and restoration of the brain motor-execution network after stroke and rehabilitation. *Frontiers of Human Neuroscience*. 2017; 9 (173): 1–15.
7. Козловская И.Б. Аfferентный контроль произвольных движений. М.: Наука; 1976. 296.
8. Молчановский В.В., Тринитатский Ю.В., Ходарев С.В. Вертеброневрология II. Клиническая анатомия и физиология двигательной системы. В 5 ч. Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ ЮФУ; 2013. 258.
9. Gracies J.M. Pathophysiology of spastic paresis. II: Emergence of muscle overactivity. *Muscle & nerve*. 2005; 31 (5): 552–571.
10. Gracies J.M. Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes. *Muscle & nerve*. 2005; 31 (5): 535–551.
11. Кадыков А.С., Черникова Л.А., Шахпаронова Н.В. Реабилитация неврологических больных. М.: МЕДпресс-информ; 2008. 564.

12. Черникова Л.А. Восстановительная неврология: инновационные технологии в нейрореабилитации. М.: МИА; 2016. 344.
13. Levack W.M., Taylor K., Siegert R.J., Dean S.G., McPherson K.M., Weatherall M. Is goal planning in rehabilitation effective? A systematic review. *Clinical Rehabilitation*. 2006; 20 (9): 739–755.
14. Дамулин И.В., Екушева Е.В. Процессы нейропластичности после инсульта. *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика*. 2014; 3: 69–74.
15. Харченко Е.П., Клименко М.И. Пластичность и регенерация мозга. *Неврологический журнал*. 2006; 11 (6): 37–45.
16. Червяков А.В., Подашева А.Г., Коржова Ю.Е., Супонева Н.А., Черникова Л.А., Пирадов М.А. Современные терапевтические возможности ритмической транскраниальной стимуляции в лечении заболеваний нервной системы. *РМЖ*. 2014; 22: 1567–1573.
17. Corbetta D., Imeri F., Gatti R. Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review. *Journal Physiotherapy*. 2015; 61: 117–124.
18. Ключков А.С., Черникова Л.А. Роботизированные и механотерапевтические устройства для восстановления функции руки после инсульта. *РМЖ*. 2014; 22: 1589–1592.
19. Иванова Г.Е., Бушкова Ю.В., Суворов А.Ю., Стаховская Л.В., Джалагония И.З., Варако Н.А., Ковязина М.С., Бушков Ф.А. Использование тренажера с многоканальной биологической обратной связью «ИМК-экзоскелет» в комплексной программе реабилитации больных после инсульта. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2017; 66 (4): 464–472.
20. Котов С.В., Турбина Л.Г., Бобров П.Д., Фролов А.А., Павлова О.Г., Курганская М.Е., Бирюкова Е.В. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса «Интерфейс мозг-компьютер + экзоскелет». *Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова*. 2014; 12: 66–72.
21. Kim T., Kim S., Lee B. Effects of Action Observational Training Plus Brain-Computer Interface-Based 5 Functional Electrical Stimulation on Paretic Arm Motor Recovery in Patient with Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International*. 2016; 23 (1): 39–47.
22. Фролов А.А., Бирюкова Е.В., Бобров П.Д. Интерфейс «мозг-компьютер»: физиологические предпосылки и клиническое применение. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2013; 11: 44–56.
23. Бобров П.Д., Исаев М.Р., Коршаков А.В., Огонесян В.В., Керечанин А.В., Поподько А.И. Источники электрофизиологической и гемодинамической активности, значимые для управления гибридным интерфейсом «мозг-компьютер», основанным на распознавании паттернов ЭЭГ и спектрограмм ближнего инфракрасного диапазона при воображении движений. *Физиология человека*. 2016; 42 (3): 12–24.
24. Mihara M., Hattori N., Hatakenaka M., Yagura H., Kawano T., Hino T. Near-infrared Spectroscopy mediated Neurofeedback Enhances Efficacy of Motor Imagerybased Training in Poststroke Victims. *Stroke*. 2013; 44 (4): 109–118.
25. Song J., Young B.M., Nigogosyan Z., Walton L.M., Nair V.A., Grogan S.W. Characterizing relationships of DTI, fMRI, and motor recovery in stroke rehabilitation utilizing brain-computer interface technology. *Frontiers in Neuroengineering*. 2014; 7: 31.
26. Wolpaw J.R., McFarland D.J. Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004; 101 (51): 178.
27. Donchin E., Spencer K.M., Wijesinghe R. The Mental Prosthesis: Assessing the Speed of a P300-Based Brain-Computer Interface. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000; 8 (2): 174–179.
28. Коньшев В.А., Карловский Д.В., Славуцкая А.В., Авдейчик В.Г., Шмелев А.С., Шевелев И.А. Исследование опознания задуманных букв и слов по волне P300 вызванного потенциала мозга человека с помощью нейрокомпьютерного интерфейса. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова*. 2007; 93 (2): 141–149.
29. Pineda J. The functional significance of mu rhythms: translating «seeing» and «hearing» into «doing». *Brain research reviews*. 2005; 50: 57–68.
30. Takemi M., Masakado Y., Liu M., Ushiba J. Sensorimotor event-related desynchronization represents the excitability of human spinal motoneurons. *Neuroscience*. 2015; 297: 58–67.

31. Pfurtscheller G., Niedermeyer E., Lopes da Silva F.H. EEG event-related desynchronization (ERD), event related synchronization (ERS). *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, related fields*. 4-th ed. Baltimore; 1999: 958–967.
32. Pfurtscheller G., Neuper C. Future prospects of ERD/ERS in the context of brain-computer interface (BCI) 35 developments. *Prog. Brain Res.* 2006; 159: 433–437.
33. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Curio G., Müller K.-R. The Berlin braincomputer interface: Machine learning based detection of user specific brain states. *Journal of universal computer science.* 2006; 12 (6): 581–607.
34. Ang K.K., Guan C., Phua K.S. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke. *Frontiers in neuroengineering.* 2014; 7: 30.
35. Ang K.K., Chua K.S., Phua K.S. A Randomized Controlled Trial of EEG Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clinical EEG and neuroscience.* 2015; 46 (4): 310–320.
36. Chaudhary U., Birbaumer N., Ramos-Murguialday A. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology.* 2016; 12 (9): 513–525.
37. Ramos-Murguialday A., Broetz D., Rea M., Laer L., Yilmaz O., Brasil F.L. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of Neurology.* 2013; 74 (1): 100–108.
38. Фролов А.А., Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А., Котов С.В., Турбина Л.Г., Бобров П.Д., Бирюкова Е.В., Кондур А.А., Иванова Г.Е., Старицын А.Н., Бушкова Ю.В., Джалаго-ния И.З., Курганская М.Е., Павлова О.Г., Будилин С.Ю., Азиатская Г.А., Хижникова А.Е., Червяков А.В., Лукьянов А.Л., Надарейшвили Г.Г. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК-экзоскелет при постинсультном парезе руки. *Вестник РГМУ.* 2016; 2: 17–25.
39. Мокиенко О.А., Бобров П.Д., Черникова Л.А., Фролов А.А. Основанный на воображении движений интерфейс-мозг компьютер в реабилитации пациентов с гемипарезом. *Бюллетень сибирской медицины.* 2013; 12 (2): 30–35.
40. Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А., Супонева Н.А., Пирадов М.А., Фролов А.А. Интерфейс «мозг-компьютер»: первый опыт применения в клинической практике в России. *Физиология человека.* 2016; 42 (1): 31–39.

## BRAIN-COMPUTER INTERFACE FOR POST-STROKE REHABILITATION OF PATIENTS WITH MOTOR DISORDERS

Yu.A. Kryuchkov, N.V. Shchukovskiy, I.I. Sholomov

*Saratov State Medical University named after V.I. Razumovsky, Saratov, Russia*

e-mail: ukfeatxxx@mail.ru

*Acute cerebrovascular accident (ACVA) is one of the leading causes of morbidity, mortality and disability not only in the Russian Federation, but throughout the world. Various movement disorders often occur after ACVA. Recently, there has been a significant amount of interest in high-tech hardware rehabilitation methods, which can be introduced into standard recovery programs for post-stroke rehabilitation of patients with motor disorders. These methods maximize the neuroplasticity processes, ensure active involvement of patients and high-intensity trainings during various recovery periods, reducing healthcare personnel burdens. Brain-computer neural interfaces for rehabilitation and improving patients' quality of life is a promising and rapidly developing trend. The paper describes the modern pathophysiological picture of post-stroke motor disorder development, neuroplasticity mechanisms and motor rehabilitation effects. Great attention is paid to brain-computer neural interfaces as a means of patient-hardware communication. Technological devices make such communication possible as they use signals of human brain activity, and the patient receives feedback in the form of visual or tactile information. The paper presents current data on the possibilities of this technology in the post-stroke rehabilitation of patients with motor disorders. The authors describe the results of the studies conducted with the help of brain-computer neural interfaces. The theoretical and clinical efficacy of this technology was determined.*

**Keywords:** neuroplasticity, rehabilitation, motor disorders, stroke, brain-computer interface.

## References

1. *Insul't u vzroslykh: tsentral'nyy parez verkhney konechnosti* [Stroke in adults: central paresis of the upper limb]. Moscow; 2017. 106 (in Russian).
2. Belova A.N., Prokopenko S.V. *Nejroreabilitatsiya* [Neurorehabilitation]. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow: Antidor; 2010. 1288 (in Russian).
3. Hatem S.M., Saussez G., Della Faille M., Prist V., Zhang X., Dispa D., Bleyenheuft Y. Rehabilitation of Motor Function after Stroke: A Multiple Systematic Review Focused on Techniques to Stimulate Upper Extremity Recovery. *Frontiers in human neuroscience*. 2016; 10: 442.
4. Lawrence E.S., Coshall C., Dundas R., Stewart J., Rudd A.G., Howard R. Estimates of the prevalence of acute stroke impairments and disability in a multiethnic population. *Stroke*. 2001; 32 (6): 1279–1284.
5. Bach-Y-Rita P. Theoretical and practical considerations in the restoration of function after stroke. *Top Stroke Rehabilitation*. 2001; 8 (3): 1–15.
6. Bajaj S., Butler A.J., Drake D., Dhamala M. Functional organization and restoration of the brain motor-execution network after stroke and rehabilitation. *Frontiers of Human Neurosciece*. 2017; 9 (173): 1–15.
7. Kozlovskaya I.B. *Afferentnyy kontrol' proizvol'nykh dvizheniy* [Afferent control of voluntary movements]. Moscow: Nauka; 1976. 296 (in Russian).
8. Molchanovskiy V.V., Trinitatskiy Yu.V., Khodarev S.V. *Vertebronevrologiya II. Klinicheskaya anatomiya i fiziologiya dvigatel'noy sistemy* [Clinical anatomy and physiology of the motor system]. V 5 ch. Rostov-on-Don: SKNTs VSh YuFU; 2013. 258 (in Russian).
9. Gracies J.M. Pathophysiology of spastic paresis. II: Emergence of muscle overactivity. *Muscle & nerve*. 2005; 31 (5): 552–571.
10. Gracies J.M. Pathophysiology of spastic paresis. I: Paresis and soft tissue changes. *Muscle & nerve*. 2005; 31 (5): 535–551.
11. Kadykov A.S., Chernikova L.A., Shakhparonova N.V. *Reabilitatsiya nevrologicheskikh bol'nykh* [Rehabilitation of neurological patients]. Moscow: MEDpress-inform; 2008. 564 (in Russian).
12. Chernikova L.A. *Vosstanovitel'naya nevrologiya: innovatsionnye tekhnologii v nejroreabilitatsii* [Reconstructive neurology: innovative technologies in neurorehabilitation]. Moscow: MIA; 2016. 344 (in Russian).
13. Levack W.M., Taylor K., Siegert R.J., Dean S.G., McPherson K.M., Weatherall M. Is goal planning in rehabilitation effective? A systematic review. *Clinical Rehabilitation*. 2006; 20 (9): 739–755.
14. Damulin I.V., Ekusheva E.V. Protsessy nejroplastichnosti posle insul'ta [After-stroke neuroplasticity processes]. *Nevrologiya, nejropsikhiatriya, psikhosomatika*. 2014; 3: 69–74 (in Russian).
15. Kharchenko E.P., Klimenko M.I. Plastichnost' i regeneratsiya mozga [Plasticity and brain regeneration]. *Nevrologicheskij zhurnal*. 2006; 11 (6): 37–45 (in Russian).
16. Chervyakov A.V., Podasheva A.G., Korzhova Yu.E., Suponeva N.A., Chernikova L.A., Piradov M.A. Sovremennye terapevticheskie vozmozhnosti ritmicheskoy transkraniyal'noy stimulyatsii v lechenii zabol'evaniy nervnoy sistemy [Modern therapeutic possibilities of rhythmic transcranial stimulation while treating neurological disorders]. *RMZh*. 2014; 22: 1567–1573 (in Russian).
17. Corbetta D., Imeri F., Gatti R. Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review. *Journal Physiotherapy*. 2015; 61: 117–124.
18. Klochkov A.S., Chernikova L.A. Robotizirovannyye i mekhanoterapevticheskie ustroystva dlya vosstanovleniya funktsii ruki posle insul'ta [Robotic and mechanotherapeutic devices for after-stroke restoration of hand function]. *RMZh*. 2014; 22: 1589–1592 (in Russian).
19. Ivanova G.E., Bushkova Yu.V., Suvorov A.Yu., Stakhovskaya L.V., Dzhalagiya I.Z., Varako N.A., Kovyazina M.S., Bushkov F.A. Ispol'zovanie trenazhera s mnogokanal'noy biologicheskoy obratnoy svyaz'yu «IMK-ekzoskelet» v kompleksnoy programme reabilitatsii bol'nykh posle insul'ta [Using the simulator with multi-channel biofeedback “BCI-exoskeleton” in a comprehensive program of after-stroke rehabilitation]. *Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I.P. Pavlova*. 2017; 66 (4): 464–472 (in Russian).
20. Kotov S.V., Turbina L.G., Bobrov P.D., Frolov A.A., Pavlova O.G., Kurganskaya M.E., Biryukova E.V. Reabilitatsiya bol'nykh, perenesshikh insul't, s pomoshch'yu bioinzhenernogo kompleksa «Interfeys mozg-komp'yuter + ekzoskelet» [After-stroke rehabilitation of patients using the “Brain-computer +

- exoskeleton” bioengineering complex]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2014; 12: 66–72 (in Russian).
21. Kim T., Kim S., Lee B. Effects of Action Observational Training Plus Brain-Computer Interface-Based 5 Functional Electrical Stimulation on Paretic Arm Motor Recovery in Patient with Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Occupational Therapy International*. 2016; 23 (1): 39–47.
  22. Frolov A.A., Biryukova E.V., Bobrov P.D. Interfeysy «mozg-komp'yuter»: fiziologicheskie predposylki i klinicheskoe primeneniye [Brain-computer interface: physiological background and clinical application]. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*. 2013; 11: 44–56 (in Russian).
  23. Bobrov P.D., Isaev M.R., Korshakov A.V., Ogonosyan V.V., Kerechanin A.V., Popod'ko A.I. Istochniki elektrofiziologicheskoy i gemodinamicheskoy aktivnosti, znachimye dlya upravleniya gibridnym interfeysom «mozg-komp'yuter», osnovannym na raspoznavanii patternov EEG i spektrogramm blizhnego infrakrasnogo diapazona pri voobrazhenii dvizheniy [Sources of electrophysiological and foci of hemodynamic brain activity relevant for controlling a hybrid brain-computer interface based on classification of EEG patterns and near-infrared spectrography signals during motor imagery]. *Fiziologiya cheloveka*. 2016; 42 (3): 12–24 (in Russian).
  24. Mihara M., Hattori N., Hatakenaka M., Yagura H., Kawano T., Hino T. Near-infrared Spectroscopy mediated Neurofeedback Enhances Efficacy of Motor Imagerybased Training in Poststroke Victims. *Stroke*. 2013; 44 (4): 109–118.
  25. Song J., Young B.M., Nigogosyan Z., Walton L.M., Nair V.A., Grogan S.W. Characterizing relationships of DTI, fMRI, and motor recovery in stroke rehabilitation utilizing brain-computer interface technology. *Frontiers in Neuroengineering*. 2014; 7: 31.
  26. Wolpaw J.R., McFarland D.J. Control of a two-dimensional movement signal by a noninvasive brain-computer interface in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2004; 101 (51): 178.
  27. Donchin E., Spencer K.M., Wijesinghe R. The Mental Prosthesis: Assessing the Speed of a P300-Based Brain-Computer Interface. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*. 2000; 8 (2): 174–179.
  28. Konyshov V.A., Karlovskiy D.V., Slavutskaya A.V., Avdeychik V.G., Shmelev A.S., Shevelev I.A. Issledovanie opoznaniya zadumannyykh buk i slov po volne R300 vyzvannogo potentsiala mozga cheloveka s pomoshch'yu neyrokomp'yuternogo interfeysa [Study of the letter and word recognition using brain-computer interface on P300 wave of human visual evoked potential]. *Rossiyskiy fiziologicheskii zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2007; 93 (2): 141–149 (in Russian).
  29. Pineda J. The functional significance of mu rhythms: translating «seeing» and «hearing» into «doing». *Brain research reviews*. 2005; 50: 57–68.
  30. Takemi M., Masakado Y., Liu M., Ushiba J. Sensorimotor event-related desynchronization represents the excitability of human spinal motoneurons. *Neuroscience*. 2015; 297: 58–67.
  31. Pfurtscheller G., Niedermeyer E., Lopes da Silva F.H. EEG event-related desynchronization (ERD), event related synchronization (ERS). *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, related fields*. 4-th ed. Baltimore; 1999: 958–967.
  32. Pfurtscheller G., Neuper C. Future prospects of ERD/ERS in the context of brain-computer interface (BCI) 35 developments. *Prog. Brain Res*. 2006; 159: 433–437.
  33. Blankertz B., Dornhege G., Krauledat M., Curio G., Muller K.-R. The Berlin braincomputer interface: Machine learning based detection of user specific brain states. *Journal of universal computer science*. 2006; 12 (6): 581–607.
  34. Ang K.K., Guan C., Phua K.S. Brain-computer interface-based robotic end effector system for wrist and hand rehabilitation: results of a three-armed randomized controlled trial for chronic stroke. *Frontiers in neuroengineering*. 2014; 7: 30.
  35. Ang K.K., Chua K.S., Phua K.S. A Randomized Controlled Trial of EEG Based Motor Imagery Brain-Computer Interface Robotic Rehabilitation for Stroke. *Clinical EEG and neuroscience*. 2015; 46 (4): 310–320.
  36. Chaudhary U., Birbaumer N., Ramos-Murguialday A. Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology*. 2016; 12 (9): 513–525.
  37. Ramos-Murguialday A., Broetz D., Rea M., Laer L., Yilmaz O., Brasil F.L. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of Neurology*. 2013; 74 (1): 100–108.

38. Frolov A.A., Mokienko O.A., Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A., Kotov S.V., Turbina L.G., Bobrov P.D., Biryukova E.V., Kondur A.A., Ivanova G.E., Staritsyn A.N., Bushkova Yu.V., Dzhalagonyia I.Z., Kurganskaya M.E., Pavlova O.G., Budilin S.Yu., Aziatskaya G.A., Khizhnikova A.E., Chervyakov A.V., Luk'yanov A.L., Nadareyshvili G.G. Predvaritel'nye rezul'taty kontroliruemogo issledovaniya effektivnosti tekhnologii IMK-ekzoskelet pri postinsul'tnom pareze ruki [Preliminary results of a controlled study of BCI-exoskeleton technology efficacy in patients with post-stroke arm paresis]. *Vestnik RGMU*. 2016; 2: 17–25 (in Russian).
39. Mokienko O.A., Bobrov P.D., Chernikova L.A., Frolov A.A. Osnovanny na voobrazhenii dvizheniy interfeys-mozg komp'yuter v reabilitatsii patsientov s gemiparezom [Motion-based computer-brain interface for patients with hemiparesis]. *Byulleten' sibirskoy meditsiny*. 2013; 12 (2): 30–35 (in Russian).
40. Mokienko O.A., Lyukmanov R.Kh., Chernikova L.A., Suponeva N.A., Piradov M.A., Frolov A.A. Interfeys «mozg-komp'yuter»: pervyy opyt primeneniya v klinicheskoy praktike v Rossii [Brain-computer interface: First case record in clinical practice in Russia]. *Fiziologiya cheloveka*. 2016; 42 (1): 31–39 (in Russian).