

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫМИ ПАЛЬЦАМИ ФАНТОМА КИСТИ РУКИ ЧЕЛОВЕКА В КОНТУРЕ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ–КОМПЬЮТЕР НА ВОЛНЕ P300

А. Я. Каплан^{1,2✉}, Д. Д. Жигульская¹, Д. А. Кирьянов¹

¹ Лаборатория нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов, биологический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва

² Лаборатория разработки мозго-машинных интерфейсов и прикладной нейроинженерии, Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

В исследовании проверяли предположение, что в контуре предложенного комплекса интерфейса мозг–компьютер на основе волны P300 (ИМК–P300) и антропоморфного фантома кисти руки человек сможет управлять сгибанием целевого пальца фантома, произвольно фокусируя свое внимание на расположенном на этом пальце световом маркере. Поскольку каждое правильное срабатывание пальцев фантома будет свидетельствовать о достаточной выраженности направленных на это действие мысленных усилий, открывается перспектива создания на этой основе идеомоторного тренажера мелких движений кисти. В качестве испытуемых-добровольцев были задействованы 21 человек обоих полов в возрасте 18–25 лет. Было показано, что испытуемые действительно уже в первый экспериментальный день приобретали навык управления пальцами фантома руки в контуре ИМК–P300 с надежностью не менее 69 % успешных попыток. При этом основные ошибки управления были связаны с недостаточной концентрацией внимания на сигналах светового маркера целевых пальцев фантома. Сделано предположение, что разработанный комплекс «ИМК–P300 — Фантом кисти» может послужить основой для создания тренажера мелкой моторики кисти.

Ключевые слова: интерфейс мозг–компьютер, ИМК, электроэнцефалограмма, нейрореабилитация, инсульт, вызванные потенциалы, P300

Финансирование: работа выполнена при частичной поддержке Фонда «Сколково», грант № 1110034, и РФФ, грант № 15-19-20053.

✉ **Для корреспонденции:** Александр Яковлевич Каплан
117234, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр. 12; akaplan@mail.ru

Статья поступила: 11.04.2016 Статья принята к печати: 15.04.2016

STUDYING THE ABILITY TO CONTROL HUMAN PHANTOM FINGERS IN P300 BRAIN-COMPUTER INTERFACE

Kaplan AY^{1,2✉}, Zhigulskaia DD¹, Kirjanov DA¹

¹ Laboratory for Neurophysiology and Neuro-Computer Interfaces, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Laboratory for Brain-Machine Interfaces and Applied Neuroengineering, Lobachevsky National Research State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russia

In this work we have tested the assumption that an individual can control a target finger of a phantom by voluntarily focusing his attention on the luminous marker located on that finger in the complex of a P300 wave-based brain-computer interface (P300 BCI) and an anthropomorphic phantom. Because each correct movement of phantom fingers indicates a sufficient mental effort aimed at this action, creating a new ideomotor training simulator of smaller movements of the hand becomes possible. Our study included 21 volunteer subjects of both sexes aged 18–25. It was shown that with P300 BCI complex the subjects learned to control phantom fingers on the first day of the experiment, the percentage of successful attempts being no less than 69 %. Failures were mainly related to the insufficient attention focus on luminous markers on the target phantom fingers. We hypothesize that P300 BCI — Hand Phantom complex can be a basis for developing a fine motor skills simulator.

Keywords: brain-computer interface, BCI, electroencephalogram, neurorehabilitation, stroke, evoked potentials, P300

Funding: this work was partially supported by the Skolkovo Foundation, grant no. 1110034, and the Russian Science Foundation, grant no. 15-19-20053.

✉ **Correspondence should be addressed:** Alexandr Kaplan
ul. Leninskie gory, d. 1, str. 12, Moscow, Russia, 117234; akaplan@mail.ru

Received: 11.04.2016 Accepted: 15.04.2016

Включение элементов идеомоторной тренировки (mental practice) в планы восстановления моторных функций после инсульта и нейротравм становится одним из трендов современной нейрореабилитации [1–4]. В своей основе этот подход восходит к идеям Н. А. Бернштейна о том, что истинный ответ на задачи окружающей среды — не столь-

ко выполнение моторного акта, сколько построение ментального плана его реализации [5]. В значительной мере именно этот центральный интеграционный процесс лежит в основе запуска пластических перестроек в нервной ткани, ведущих к воссозданию нейронных пулов управления движениями [6, 7]. Мысленное представление движения,

иницирующее реконструкцию его плана в нейронных сетях, может оказаться не менее действенным в процессах восстановления нарушенной двигательной координации, чем физическое выполнение самого движения [1, 3, 4]. Действительно, в исследованиях с использованием транскраниальной магнитной стимуляции для тестирования корковой возбудимости показана активация корковых структур в области моторного представительства на фоне мысленного представления движения [8, 9].

Однако, несмотря на кажущуюся легкость мысленного воспроизведения движения, реальная эффективность этого процесса в отношении запуска активационных перестроек в корковых структурах зависит от интенсивности, стабильности и направленности, связанных с этим мысленных усилий [10, 11]. Между тем без обратной связи для человека о характеристиках процесса его умственного представления движений, эти усилия при повторении быстро ослабевают, моторные образы тускнеют, а вся процедура идеомоторного тренинга постепенно теряет интерес для пациента. Технологии интерфейсов мозг–компьютер (ИМК), которые на основе регистрации в ЭЭГ депрессии μ -ритмов позволяют детектировать мысленные представления движений и трансформировать эти события в команды для управления объектами виртуальной или физической реальности, очевидно позволяют сформировать искомый контур обратной связи [2, 9, 10, 12]. Таким образом, мысленные усилия оператора в виде представления движений могут транслироваться через ИМК в наблюдаемые им действия экранных или физических объектов, что при соответствующей мотивации позволяет выработать навык интенсивного и устойчивого представления движений. Эксплуатация этого навыка в тренировочных сессиях является залогом максимально эффективного запуска пластических перестроек в соответствующих структурах мозга [1, 9, 12].

Узким местом этого подхода является крайне слабая дифференцированность мысленных представлений движения в отношении последующего их детектирования с помощью ИМК. По сути дела, посредством ИМК на основе моторного представления надежно (т. е. с вероятностью более 0,6–0,7) детектируются всего 2–3 образа движения, как правило, — движения левой или правой рукой и ногами [10, 12]. Этого далеко недостаточно при необходимости создания многих каналов обратной связи для мысленной тренировки мелкой моторики, наиболее трудно поддающейся восстановлению, например, движений отдельными пальцами кисти руки.

В то же время существует технология ИМК, основанная на надежном детектировании посредством ЭЭГ фокусов внимания человека к внешним экранным символам с созданием на этой основе библиотеки не менее чем из 36 команд [13]. Детектирование фокусов внимания в этой технологии производится по реакциям в ЭЭГ на быстрые подсветки внешних объектов, например экранных символов, с выделением реакции на целевой стимул по специфическим признакам этих реакций, в частности, по волне P300 [1, 14, 15]. Однако в силу необходимости применения стимульно-символьной среды ИМК-P300, казалось бы, имеет перспективу применения в реабилитационной медицине только как коммуникатор, например, для набора текстов пациентами с тяжелыми нарушениями движений и речи или для активации кнопок пультов управления [16].

В настоящей работе проверяется гипотеза о том, что ИМК-P300 можно использовать по новому назначению — для создания тренажера мелкой моторики, напри-

мер пальцев кисти руки, требующего многоканальной обратной связи. В качестве исполнительного устройства для подобного тренажера предложено использовать антропоморфный фантом кисти руки с подвижными пальцами. Можно предположить, что в контуре предлагаемого в настоящей работе комплекса «ИМК-P300 — Фантом кисти» человек сможет управлять сгибанием пальцев фантома, произвольно фокусируя на них свое внимание. Запуск действия мысленно выбранного таким образом пальца фантома будет свидетельствовать о достаточной напряженности мысленных усилий для концентрации внимания на этом процессе.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

В исследовании приняли участие 21 испытуемый-доброволец (6 мужчин, 15 женщин; 18–25 лет) с ведущей правой рукой и с нормальным или скорректированным до 100 % зрением. Все испытуемые подписали Информированное согласие на участие в исследовании, одобренном Комиссией по биоэтике МГУ им. М. В. Ломоносова. Испытуемых размещали в удобном кресле с расположением рук на подлокотниках. Над правой рукой испытуемого, закрытой непрозрачной тканью, располагали антропоморфную фантомную кисть с подвижными пальцами, соединенными посредством гибких тросиков с сервоприводами. На последних фалангах каждого пальца фантома были закреплены световые маркеры в виде белых светодиодов яркостью 5 кд/м², включение или выключение которых служило зрительными стимулами для получения в ЭЭГ потенциалов, связанных с событием (ПСС).

Электроэнцефалограмму регистрировали монополярно с помощью 8 электродов в отведениях Cz, Pz, PO3, PO4, PO7, PO8, O1, O2, с объединенным ушным референтным электродом и с электродом Ground в позиции Fpz. В качестве регистратора биопотенциалов использовали электроэнцефалограф NVX52 («МКС», РФ) со следующими установками: частота выборки отсчетов 500 Гц, полоса пропускания 0,1–30 Гц (фильтр Баттерворта 2-го порядка), режекторный фильтр — 50 Гц.

Для выделения ПСС на целевые стимулы, т. е. на подсветки того пальца фантома, к которому в конкретный момент обращалось внимание испытуемого, использовали линейный классификатор Фишера, основанный на методе линейного дискриминантного анализа Фишера (LDA), выходное значение которого при превышении определенного порога преобразовывалось в команду для сгибания соответствующего пальца фантома. Анализ ЭЭГ классификатором проводился в окнах длительностью 10 мс, на которые был разбит интервал анализа от 0 до 800 мс относительно предъявления стимула. Команды для включения стимулов и сервомоторов были реализованы на фантоме с помощью двух программируемых микроЭВМ Freeduino Nano v5 ATmega328 (РФ). Обе микроЭВМ подключались к компьютеру через USB-порты. Фантом также был подключен к усилителю NVX52, с помощью которого регистрировали ЭЭГ, что обеспечивало синхронизированную запись ПСС, их обработку классификатором и генерацию команд.

Экспериментальная сессия представляла собой рандомизированную последовательность предъявления десяти подсветок каждого пальца фантома, необходимую для осуществления одной команды, то есть для сгибания одного пальца фантома, на подсветки которого обращали внимание испытуемого. Каждая команда определялась

предварительным указанием для испытуемого, какой палец фантома он должен выбрать. Параметрами включения светодиодов были длительность 50 мс и межстимульный интервал 150 мс. Каждому испытуемому с небольшими перерывами предъявляли 20 экспериментальных сессий, по результатам которых вычисляли показатели эффективности его работы в контуре ИМК-Р300 с фантомом кисти.

Непосредственно перед экспериментальной сессией производили обучение классификатора на детерминированных выборках целевых и нецелевых ПСС, занимавшее около 4 мин.

Тестировали два типа сигналов в контуре интерфейса мозг–компьютер: с фокусированием внимания испытуемого на включение подсветки пальца фантома или на ее выключение с целью выделения режима, наиболее эффективного для управления фокусом внимания. В обоих случаях длительность самого сигнала устанавливали в 50 мс.

Эффективность управления пальцами фантома вычисляли по показателям точности управления: число правильных, неправильных и отсутствующих сгибаний пальцев фантома при выполнении задания на фокусирование внимания на конкретном пальце фантома. Статистическую обработку проводили по всем испытуемым в программе Statsoft Statistica v. 7.0. Для выявления различий в эффективности работы двух режимов использовали непараметрический критерий Вилкоксона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены статистические данные оценки точности работы испытуемых при выборе конкретного пальца фантома для сгибания посредством перемещения на него фокуса внимания в процентах от общего числа попыток. Усредненные по группе оценки точности управления пальцами фантома руки для режимов с использованием в качестве стимулов подсветки или, наоборот, выключения подсветки не различались статистически и составляли 69 и 57 % соответственно, при том, что максимальная точность управления, показанная некоторыми испытуемыми, достигала в обоих режимах 95 %. При этом индивидуальный разброс показателей точности работы во втором режиме значительно больше, чем в первом. Это позволяет сделать вывод, что использование технологии ИМК-Р300 с размещением световых маркеров на управляемых от ИМК пальцах фантомной кисти можно взять за

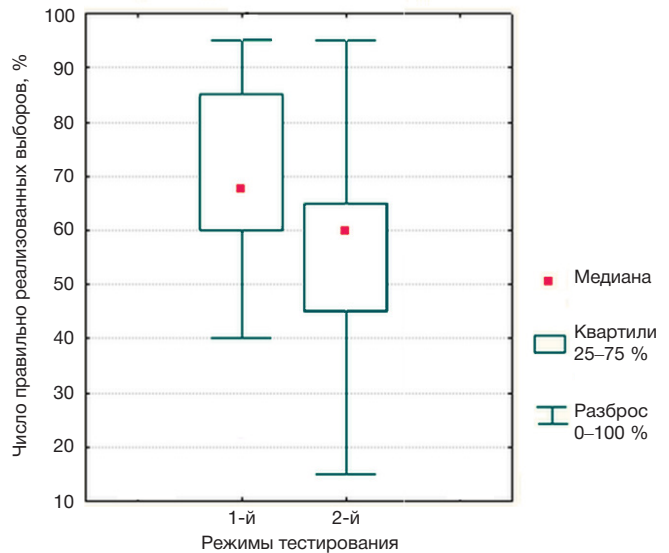


Рис. 1. Точность управления пальцами фантома кисти в двух режимах работы ИМК
В первом и втором режимах тестирования стимулами являются включение и выключение световых маркеров соответственно.

основу для создания нейротренажера мелкой моторики с индивидуальной настройкой конкретного режима световой сигнализации.

Испытуемым, как видно из рис. 1, даже в оптимальном режиме в 30 % случаев не удается выдать команду на сгибание целевого пальца путем перемещения внимания к расположенному на этом пальце световому маркеру. Поскольку в ошибочных случаях либо сгибается нецелевой палец, либо вообще не происходит никакого действия, был выполнен анализ ошибок того и другого рода, результаты которого приведены на рис. 2. Оценки даны в абсолютных значениях числа тех и других ошибок при 20 попытках загрузить сгибание целевого пальца. Напомним, что при каждой пробе у испытуемого существует один правильный ответ и 5 неправильных (ответы четырех нецелевых пальцев и один ответ, заключающийся в отсутствии движений всех пальцев).

Как видно из рис. 2, испытуемые редко делают ошибки с выбором для сгибания нецелевого пальца, в среднем не более 1,5 ошибок за 20 попыток, но в гораздо большем числе случаев, 5–6 раз в зависимости от режима, терпят

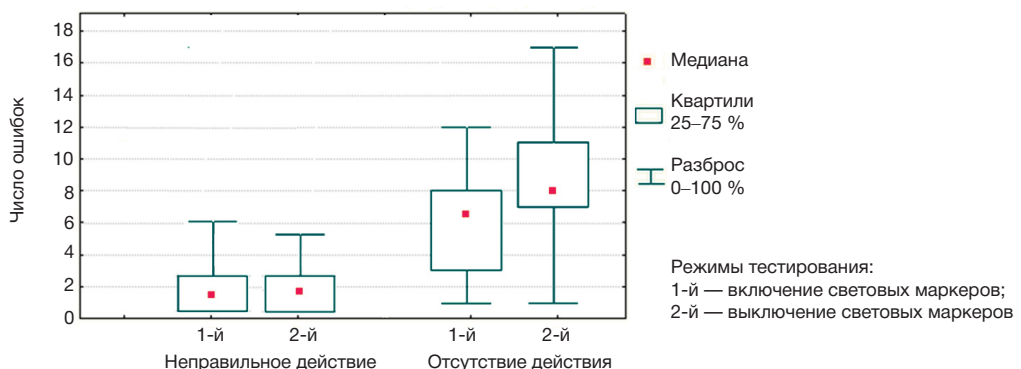


Рис. 2. Число ошибок первого и второго рода для обоих режимов тестирования при попытках испытуемых дать команду на сгибание целевого пальца путем фокусирования внимания на его световом маркере

Отмечено статистически значимое различие по критерию Вилкоксона ($p < 0,05$) при сравнении средних величин числа ошибок первого и второго рода для каждого режима тестирования.

неудачу с запуском сгибания любого пальца, оставляя фантомную кисть без движения. Статистический анализ по критерию Вилкоксона показал существование значимых различий ($p < 0,05$) при сравнении числа ошибок первого и второго рода для каждого режима тестирования.

Запуск движения нецелевого пальца является, скорее всего, ошибкой, связанной с неустойчивостью внимания, вследствие чего в его фокус попадает нецелевой палец, который ложно детектируется как мишень для сгибания. В то же время отсутствие команд к пальцам фантома при завершении очередной попытки активации целевого пальца свидетельствует о недостаточной концентрации внимания к подсветкам пальцев фантома, в силу чего не формируются четко выраженные ПСС на целевой стимул, и выход классификатора не достигает пороговой величины для выдачи команды.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные подтвердили сделанное в начале работы предположение о возможности создания комплекса «ИМК-Р300 — Фантом кисти», в котором человек может управлять сгибанием пальцев фантома, произвольно фокусируя на них свое внимание. Поскольку наличие сгибания мысленно выбранного таким образом пальца фантома свидетельствует о достаточной выраженности мысленных усилий человека для концентрации внимания на процессе запуска движения, вполне вероятно создание на этой основе эффективного тренажера мелкой моторики кисти.

До настоящего времени, однако, неизвестны попытки использования технологии ИМК-Р300 в качестве обратной связи в контурах тренировки моторной функции, что, казалось бы, было оправдано отсутствием в этом контуре

необходимости собственно представления движения оператором, и, наоборот, привлечением его внимания к внешним объектам.

Однако с исторических работ Ботвинника и Коэна [17], многократно подтвержденных в последующем [18, 19], было известно, как при определенных условиях внешний объект, например в виде резиновой руки, может легко и надежно идентифицироваться с внутренним представлением своей собственной руки. Более того, для активации нейронов моторной коры не обязательно представлять движение собственной руки — достаточно наблюдать за аналогичным движением руки другого человека или ее искусственной копии [20, 21]. Все это вместе вкуче с полнотными в настоящей работе данными о возможности встраивания технологии ИМК-Р300 в контуры управления движениями отдельными пальцами фантома кисти свидетельствует о хорошей перспективе создания нейротренажера мелкой моторики на основе комплекса «ИМК-Р300 — Фантом кисти».

ВЫВОДЫ

Технология интерфейса мозг-компьютер на волне Р300 может обеспечить формирование команд мысленного управления пальцами фантома кисти руки человека с надежностью не менее 69 %, что вполне достаточно для создания нейротренажеров мелкой моторики.

Большая часть ошибок оператора ИМК-Р300 при управлении пальцами фантома кисти руки человека связана с недостаточной концентрацией внимания на сигналах световых маркеров, расположенных на пальцах фантома, что указывает на необходимость совершенствования этой стимульной среды.

Литература

- Каплан А. Я. Нерофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации. Физиол. чел. 2016; 42 (1): 118–27.
- Мокиенко О. А., Черникова Л. А., Фролов А. А., Бобров П. Д. Воображение движения и его практическое применение. Журн. высш. нервн. деят. 2013. 63 (2): 195–204.
- Park J, Lee N, Cho M, Kim D, Yang Y. Effects of mental practice on stroke patients' upper extremity function and daily activity performance. J Phys Ther Sci. 2015 Apr; 27 (4): 1075–7.
- Kho AY, Liu KP, Chung RC. Meta-analysis on the effect of mental imagery on motor recovery of the hemiplegic upper extremity function. Aust Occup Ther J. 2014 Apr; 61 (2): 38–48.
- Бернштейн Н. А. Физиология движений и активность. Газенко О. Г., редактор. М.: Наука; 1990. 494 с.
- Скворцова В. И., Крылов В. В. Геморрагический инсульт: Практическое руководство. М: ГЭОТАР-Медиа; 2005. 160 с.
- Hara Y. Brain plasticity and rehabilitation in stroke patients J Nippon Med Sch. 2015; 82 (1): 4–13.
- Mokienko OA, Chervyakov AV, Kulikova SN, Bobrov PD, Chernikova LA, Frolov AA, et al. Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects. Front Comput Neurosci. 2013 Nov 22; 7: 168.
- Yuan H, He B. Brain-computer interfaces using sensorimotor rhythms: current state and future perspectives. IEEE Trans Biomed Eng. 2014 May; 61 (5): 1425–35.
- Васильев А. Н., Либуркина С. П., Каплан А. Я. Латерализация паттернов ЭЭГ у человека при представлении движений руками в интерфейсе мозг-компьютер. Журн. высш. нервн. деят. 2016; 66 (3): 1–11.
- Machado S, Lattari E, de Sá AS, Rocha NB, Yuan TF, Paes F, et al. Is mental practice an effective adjunct therapeutic strategy for upper limb motor restoration after stroke? A systematic review and meta-analysis. CNS Neurol Disord Drug Targets. 2015; 14 (5): 567–75.
- Фролов А. А., Бирюкова Е. В., Бобров П. Д., Мокиенко О. А., Платонов А. К., Пряничников В. Е. и др. Принципы нейро-реабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг-компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетом. Физиол. чел. 2013; 39 (2): 99–105.
- Powers JC, Bieliaieva K, Wu S, Nam CS. The Human Factors and Ergonomics of P300-Based Brain-Computer Interfaces. Brain Sci. 2015 Aug 10; 5 (3): 318–56.
- Bamdad M, Zarshenas H, Auais MA. Application of BCI systems in neurorehabilitation: a scoping review. Disabil Rehabil Assist Technol. 2015; 10 (5): 355–64.
- Kaplan AY, Shishkin SL, Ganin IP, Basyul IA, Zhigalov AY. Adapting the P300-based brain-computer interface for gaming: a review. IEEE Trans Comput Intell AI Games (Special Issue on Brain/Neuronal-Computer Games Interfaces and Interaction). 2013; 5 (2): 141–9.
- Cipresso P, Carelli L, Solca F, Meazzi D, Meriggi P, Poletti B, et al. The use of P300-based BCIs in amyotrophic lateral sclerosis: from augmentative and alternative communication to cognitive assessment. Brain Behav. 2012 Jul; 2 (4): 479–98.
- Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. Nature. 1998 Feb 19; 391 (6669): 756.
- Kammers MP, de Vignemont F, Verhagen L, Dijkerman HC.

The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia*. 2009 Jan; 47 (1): 204–11.

19. Kalckert A, Ehrsson HH. The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Conscious Cogn*. 2014 May; 26: 117–32.

20. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. Neurophysiological mechanisms

underlying the understanding and imitation of action. *Nat Rev Neurosci*. 2001 Sep; 2 (9): 661–70.

21. Gatti R, Tettamanti A, Gough PM, Riboldi E, Marinoni L, Buccino G. Action observation versus motor imagery in learning a complex motor task: a short review of literature and a kinematics study. *Neurosci Lett*. 2013 Apr 12; 540: 37–42.

References

- Kaplan AYa. Nerofiziologicheskie osnovaniya i prakticheskie realizatsii tehnologii mozg-mashinnykh interfeisov v neurologicheskoi reabilitatsii. *Hum Physiol*. 2016; 42 (1): 118–27. Russian.
- Mokienko OA, Chernikova LA, Frolov AA, Bobrov PD. [Motor imagery and its practical application]. *Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova*. 2013 Mar–Apr; 63 (2): 195–204. Russian.
- Park J, Lee N, Cho M, Kim D, Yang Y. Effects of mental practice on stroke patients' upper extremity function and daily activity performance. *J Phys Ther Sci*. 2015 Apr; 27 (4): 1075–7.
- Kho AY, Liu KP, Chung RC. Meta-analysis on the effect of mental imagery on motor recovery of the hemiplegic upper extremity function. *Aust Occup Ther J*. 2014 Apr; 61 (2): 38–48.
- Bernshtein NA. Fiziologiya dvizhenii i aktivnost'. Gazenko OG, editor. Moscow: Nauka; 1990. 494 p. Russian.
- Skvortsova VI, Krylov VV. Gemorragicheskii insult: Prakticheskoe rukovodstvo. Moscow: GEOTAR-Media; 2005. 160 p. Russian.
- Hara Y. Brain plasticity and rehabilitation in stroke patients. *J Nippon Med Sch*. 2015; 82 (1): 4–13.
- Mokienko OA, Chervyakov AV, Kulikova SN, Bobrov PD, Chernikova LA, Frolov AA, et al. Increased motor cortex excitability during motor imagery in brain-computer interface trained subjects. *Front Comput Neurosci*. 2013 Nov 22; 7: 168.
- Yuan H, He B. Brain-computer interfaces using sensorimotor rhythms: current state and future perspectives. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2014 May; 61 (5): 1425–35.
- Vasil'ev AN, Liburkina SP, Kaplan AYa. Lateralizatsiya patternov EEG u cheloveka pri predstavlenii dvizhenii rukami v interfeise mozg-komp'yuter. *Zh Vyssh Nerv Deiat Im I P Pavlova*. 2016; 66 (3): 1–11. Russian.
- Machado S, Lattari E, de Sá AS, Rocha NB, Yuan TF, Paes F, et al. Is mental practice an effective adjunct therapeutic strategy for upper limb motor restoration after stroke? A systematic review and meta-analysis. *CNS Neurol Disord Drug Targets*. 2015; 14 (5): 567–75.
- Frolov AA, Biryukova EV, Bobrov PD, Mokienko OA, Platonov AK, Pryanichnikov VE, et al. Printsipy neiroreabilitatsii, osnovannye na ispol'zovanii interfeisa "mozg-komp'yuter" i biologicheski adekvatnogo upravleniya ekzoskeletonom. *Hum Physiol*. 2013; 39 (2): 99–105. Russian.
- Powers JC, Bielaieva K, Wu S, Nam CS. The Human Factors and Ergonomics of P300-Based Brain-Computer Interfaces. *Brain Sci*. 2015 Aug 10; 5 (3): 318–56.
- Bamdad M, Zarshenas H, Auais MA. Application of BCI systems in neurorehabilitation: a scoping review. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2015; 10 (5): 355–64.
- Kaplan AY, Shishkin SL, Ganin IP, Basyul IA, Zhigalov AY. Adapting the P300-based brain-computer interface for gaming: a review. *IEEE Trans Comput Intell AI Games (Special Issue on Brain/Neuronal-Computer Games Interfaces and Interaction)*. 2013; 5 (2): 141–9.
- Cipresso P, Carelli L, Solca F, Meazzi D, Meriggi P, Poletti B, et al. The use of P300-based BCIs in amyotrophic lateral sclerosis: from augmentative and alternative communication to cognitive assessment. *Brain Behav*. 2012 Jul; 2 (4): 479–98.
- Botvinick M, Cohen J. Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*. 1998 Feb 19; 391 (6669): 756.
- Kammers MP, de Vignemont F, Verhagen L, Dijkerman HC. The rubber hand illusion in action. *Neuropsychologia*. 2009 Jan; 47 (1): 204–11.
- Kalckert A, Ehrsson HH. The moving rubber hand illusion revisited: comparing movements and visuotactile stimulation to induce illusory ownership. *Conscious Cogn*. 2014 May; 26: 117–32.
- Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V. Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nat Rev Neurosci*. 2001 Sep; 2 (9): 661–70.
- Gatti R, Tettamanti A, Gough PM, Riboldi E, Marinoni L, Buccino G. Action observation versus motor imagery in learning a complex motor task: a short review of literature and a kinematics study. *Neurosci Lett*. 2013 Apr 12; 540: 37–42.