

## РЕАБИЛИТАЦИЯ БОЛЬНЫХ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ С ПОМОЩЬЮ ЭКЗОСКЕЛЕТА КИСТИ, УПРАВЛЯЕМОГО ИНТЕРФЕЙСОМ «МОЗГ–КОМПЬЮТЕР»

П. Д. Бобров<sup>1,2✉</sup>, Е. В. Бирюкова<sup>1,2</sup>, Б. А. Поляев<sup>1</sup>, О. А. Лайшева<sup>1,3</sup>, Е. Л. Усачёва<sup>3</sup>, А. В. Соколова<sup>3</sup>, Д. И. Михайлова<sup>3</sup>, К. Н. Дементьева<sup>3</sup>, И. Р. Федотова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, Москва, Россия

<sup>3</sup> Детская клиническая больница Российского национального исследовательского медицинского университета имени Н. И. Пирогова, Москва, Россия

Детский церебральный паралич — одно из тяжелых заболеваний центральной нервной системы у детей, сопровождающееся двигательными нарушениями. Целью работы было определить эффективность применения комплекса, объединяющего интерфейс «мозг–компьютер» (ИМК) и экзоскелет кисти, в качестве средства восстановления двигательной функции у пациентов с ДЦП в дополнении к основной терапии. У 14 детей и подростков по шкалам ARAT, Fugl-Meyer, Jebsen–Taylor оценивали изменение двигательной функции в результате терапии, дополненной 7–10 процедурами с комплексом ИМК–экзоскелет, а также исследовали свойства источников  $\mu$ -ритма ЭЭГ при воображении движений во время управления ИМК. После процедур были выявлены достоверно положительный прирост баллов по шкалам Fugl-Meyer (7 (2; 11) — для активных движений руки; 4,5 (1; 6) — для проксимальных отделов и 2,5 (0; 5) — для кисти), ARAT (7,5 (1; 31) — для общей суммы баллов, 1,5 (0; 12) — для шарового и 1,5 (0; 8) — для цилиндрического захвата) и достоверно отличное от нуля снижение времени выполнения трех из семи задач теста Jabsen–Taylor (–1 (–4,13; 0,25) — для имитации кормления; –1 (–2; 0) — для перестановки легких и тяжелых банок). Средняя вероятность правильного распознавания ИМК составила 0,51 (0,45; 0,54) (max = 0,70). В большинстве записей ЭЭГ были выделены источники  $\mu$ -ритма, как в сохранном, так и в пораженном полушарии. Показано наличие десинхронизации  $\mu$ -ритма при воображении движений, от степени которой достоверно зависит точность работы ИМК. Результаты показывают, что применение комплекса ИМК–экзоскелет эффективно дополняет стандартную реабилитацию детей с ДЦП, а также дают основания предполагать, что ее клиническая эффективность в случае ДЦП может быть доказана с привлечением большего числа пациентов.

**Ключевые слова:** ДЦП, реабилитация, интерфейс «мозг–компьютер», экзоскелет кисти, электроэнцефалограмма

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (идентификатор соглашения RFMEFI60519X0184).

**Вклад авторов:** П. Д. Бобров — обработка и анализ ЭЭГ, оценка точности работы ИМК, написание статьи; Е. В. Бирюкова — статистическая обработка клинических шкал, написание статьи; Б. А. Поляев, О. А. Лайшева, Е. Л. Усачева — дизайн клинического исследования; Е. Л. Усачева — организация клинического исследования; О. А. Лайшева, А. В. Соколова, Д. И. Михайлова, К. Н. Дементьева — разработка методики работы с детьми, сбор клинических данных; Д. И. Михайлова, К. Н. Дементьева — нейропсихологическое обследование, тренинг; И. Р. Федотова — анализ литературы. Все авторы принимали участие в интерпретации результатов и обсуждении текста статьи.

**Соблюдение этических стандартов:** исследование одобрено этическим комитетом (протокол № 184 от 15 апреля 2019 г.), проведено согласно протоколу клинической апробации 2019-63-6, утвержденному экспертным советом Минздрава России. Родители всех пациентов подписали информированное согласие на участие в исследовании; дети старше 14 лет подписывали информированное согласие дополнительно к подписи родителей.

✉ **Для корреспонденции:** Павел Дмитриевич Бобров  
ул. Островитянова, д. 1, г. Москва, 117997; p-bobrov@yandex.ru

**Статья получена:** 31.07.2020 **Статья принята к печати:** 13.08.2020 **Опубликована онлайн:** 20.08.2020

**DOI:** 10.24075/vrgmu.2020.047

## REHABILITATION OF PATIENTS WITH CEREBRAL PALSY USING HAND EXOSKELETON CONTROLLED BY BRAIN-COMPUTER INTERFACE

Bobrov PD<sup>1,2✉</sup>, Biryukova EV<sup>1,2</sup>, Polyayev BA<sup>1</sup>, Lajsheva OA<sup>1,3</sup>, Usachjova EL<sup>3</sup>, Sokolova AV<sup>3</sup>, Mihailova DI<sup>3</sup>, Dement'eva KN<sup>3</sup>, Fedotova IR<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Russian Children's Clinical Hospital of Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

Cerebral palsy (CP) is one of the most severe central nervous system diseases in childhood associated with motor impairment. The study was aimed to assess the efficiency of the complex comprising brain-computer interface (BCI) and hand exoskeleton as an instrument for the motor function recovery in patients with CP complementing the essential therapy. The Fugl-Meyer Assessment scale, ARAT test and Jebsen–Taylor function test were used in 14 children and adolescents for the motor function improvement assessment after the therapy complemented by 7–10 BCI-exoskeleton based procedures. The EEG  $\mu$ -rhythm sources properties during the motor imagery BCI control were studied. After the procedures completion, the significant improvement of the Fugl-Meyer Assessment scale score (7 (2; 11) for hand active movements; 4.5 (1; 6) for proximal arm and 2.5 (0; 5) for hand), ARAT test score (7.5 (1; 31) for total score, 1.5 (0; 12) for grasp movement and 1.5 (0; 8) for grip movement), as well as significantly different from the zero execution time reduction in three out of seven Jabsen–Taylor function test items (–1 (–4.13; 0.25) for simulated feeding; –1 (–2; 0) for moving light and heavy cans) were identified. The average BCI detection level was 0.51 (0.45; 0.54) (max = 0.70). In most EEG recordings the  $\mu$ -rhythm sources were detected, both for intact and affected hemispheres. The  $\mu$ -rhythm desynchronization associated with motor imagery was observed, significantly affecting the BCI accuracy. The results obtained indicate that the use of BCI-exoskeleton complex effectively complements the standard rehabilitation methods for children with CP, and suggest that its clinical effectiveness in individuals with CP may be proven by enrollment of more patients.

**Keywords:** cerebral palsy, rehabilitation, brain-computer interface, hand exoskeleton, EEG

**Funding:** the study received public financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project ID RFMEFI60519X0184).

**Author contribution:** Bobrov PD — EEG processing and analysis, BCI accuracy estimation, manuscript writing; Biryukova EV — assessment scales scores statistical processing, manuscript writing; Polyayev BA, Lajsheva OA, Usachjova EL — clinical trial design; Usachjova EL — clinical trial management; Lajsheva OA, Sokolova AV, Mihailova DI, Dement'eva KN — development of methods for working with children, clinical data acquisition; Mihailova DI, Dement'eva KN — neuropsychological testing, training; Fedotova IR — literature analysis. All authors contributed to interpretation of the results and discussion.

**Compliance with ethical standards:** the study was approved by the Ethics Committee of Pirogov Russian National Research Medical University (protocol № 184 dated April 15, 2019). The informed consent was submitted by all patients' parents, adolescents aged over 14 submitted the additional informed consent.

✉ **Correspondence should be addressed:** Pavel D. Bobrov  
Ostrovitjanova, 1, Moscow, 117997; p-bobrov@yandex.ru

**Received:** 31.07.2020 **Accepted:** 13.08.2020 **Published online:** 20.08.2020

**DOI:** 10.24075/brsmu.2020.047

Детский церебральный паралич (ДЦП) — одно из самых тяжелых заболеваний центральной нервной системы (ЦНС) у детей, характеризующееся органическим поражением мозга. Распространенность ДЦП в развитых странах составляет 2–3 случая на 1000 рожденных младенцев [1]. ДЦП не только является наиболее распространенной патологией ЦНС у детей, но и занимает одно из ведущих мест среди заболеваний, ведущих к инвалидности с детства.

ДЦП сопровождаются двигательными нарушениями, которые возникают в разной степени при всех распространенных формах этого заболевания: спастическая диплегия — 69,3%, гемипаретическая форма — 16,3%, атонически-астатическая форма — 9,2%, гиперкинетическая форма — 3,3%, двойная гемиплегия — 1,9% [2]. Среди методов традиционной физической реабилитации — массаж, лечебная гимнастика, аппаратная кинезиотерапия, а также физиотерапевтические и электрофизиологические процедуры, способствующие снижению спастичности. Однако снижение спастичности — только первый шаг к повышению функциональной активности пациентов. Существует насущная необходимость в применении целенаправленных функциональных методов дальнейшего восстановительного лечения. Перспективными считают те, которые основаны на стимуляции нейропластичности мозговых структур, в частности методы, использующие кинестетическое воображение движений [3]. В их основе лежит идея подкрепления успешных попыток вообразить движение при помощи зрительной и проприоцептивной обратной связи, осуществляемой экзоскелетом, управляемым через интерфейс мозг–компьютер (ИМК). ИМК классифицирует регистрируемую электроэнцефалограмму и в случае, если распознается требуемое воображение движения, включается экзоскелет, который выполняет это движение и обеспечивает проприоцептивную обратную связь. Классификация ЭЭГ возможна за счет наличия паттернов, специфичных для воображения движений, в частности, как было установлено у здоровых испытуемых, десинхронизации  $\mu$ -ритма в первичных сенсомоторных областях во время представления движения конечности [4]. Метод реабилитации, использующий экзоскелет кисти, управляемый ИМК, относят к числу эффективных методов восстановления двигательной функции (ДФ), зарекомендовавших себя при реабилитации постинсультных больных [5, 6]. Этот метод позволяет реализовать принципы современной нейрореабилитации: активное участие пациента, интенсивность и регулярность тренировок, биологическую обратную связь. Он также опробован в клинической практике рандомизированных исследований восстановления ДФ после инсульта [7–10].

Есть основания надеяться, что реабилитация с помощью комплекса ИМК–экзоскелет будет эффективной и для детей с ДЦП, так как мозговые нарушения, характерные для этого заболевания, возникают в период наибольшей адаптивности и нейропластичности, когда проекции от пораженных областей ЦНС еще не достигли своих конечных целей. Такие нарушения могут препятствовать процессам нейронного созревания [11]. Высокая адаптивность механизмов нейропластичности, свойственная раннему развитию, в норме играет сугубо положительную роль, способствуя формированию двигательных навыков. Однако в случае мозговых нарушений те же механизмы могут приводить к развитию атипичных компенсаторных двигательных синергий, препятствующих нормальному развитию, что часто имеет место у детей с ДЦП [12]. В основе этого явления лежит неадекватная пластичность, например,

когда пластические изменения нейронной активности при акцентированном использовании интактной конечности ведут к уменьшению активации остатков коркового предствительства пораженной конечности [13].

Кинестетическое воображение движения активирует механизмы нейропластичности и тем самым обучает ребенка выполнению сгибания кисти, а также облегчает выполнение, пусть и атипичных, но функционально значимых для него движений. В этом и состоит цель реабилитации с помощью комплекса ИМК–экзоскелет в случае ДЦП.

Согласно исследованиям кинестетического воображения у детей с ДЦП, воображение движения активирует те же области мозга, что и у постинсультных больных [14]. Показано также, что способность к воображению движения у здоровых детей развивается с 5 до 12 лет и способствует совершенствованию движений [15]. У детей с ДЦП эта способность устойчива, хотя и снижена по сравнению с нормой [16]. Кроме того, способность к воображению движения не зависит от латерализации поражения [17].

Таким образом, тренировки кинестетического воображения движения имеют высокий потенциал для использования восстановления ДФ у детей с ДЦП [17, 18]. Целью работы было исследовать эффективность комплекса ИМК–экзоскелет для реабилитации больных с ДЦП. Способность к воображению движения оценивали исходя из точности работы ИМК и степени десинхронизации  $\mu$ -ритма в первичных сенсомоторных областях в полушарии, контралатеральной руке, движение которой воображается.

## ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на базе Российской детской клинической больницы РНИМУ им. Н. И. Пирогова с мая 2019 по февраль 2020 г. Курсы на воображение движений с использованием комплекса ИМК–экзоскелет кисти проходили 14 пациентов (табл. 1).

Критерии включения пациентов в исследование: возраст 7–19 лет; пациенты с центральным парезом верхних конечностей, в том числе с установленным диагнозом детский церебральный паралич, острое нарушение мозгового кровообращения, травма мозга; наличие структурного поражения головного мозга по данным нейровизуализации. Критерии невключения: неспособность выполнять процедуры исследования; отказ пациента или его законного представителя от участия в исследовании; афазия в степени, исключающей понимание инструкций пациентом; грубое нарушение зрения, не позволяющее выполнять визуальные инструкции на экране компьютера; спастичность в кисти 5 баллов по модифицированной шкале Ashworth. Критерии исключения пациентов из исследования: отказ пациента от продолжения участия в исследовании; развитие острого или декомпенсация хронического заболевания с риском потенциального влияния на результаты исследования; назначение системных миорелаксантов (изменение их дозировки после включения в исследование); введение препаратов ботулинического токсина в мышцы паретичной руки после включения пациента в исследование.

При проведении процедур использовали экзоскелетный комплекс «Экзокисть-2», включающий экзоскелеты кистей, управляемые через ИМК. Пациент располагался в медицинском кресле. Его руки помещали в экзоскелеты

Таблица 1. Характеристики пациентов, включенных в исследование

Участник	Пол	Возраст	Диагноз	Латерализация
1	жен.	11	Последствие внутричерепной травмы	Левосторонний гемипарез
2	жен.	16	Спаستическая гемиплегия. Спастический гемипарез справа	Правосторонний гемипарез
			Состояние после костнопластической трепанации, функциональной гемисферотомии слева	
3	муж.	17	Спастический церебральный паралич, квадриплегия	Тетрапарез с преимущественным парезом левой руки
4	жен.	17	Детский церебральный паралич неуточненный	Левосторонний гемипарез
			Спастическая гемиплегия	
			Локализованная (фокальная) (парциальная) симптоматическая эпилепсия и эпилептические синдромы с комплексными парциальными судорожными припадками. Структурная фокальная эпилепсия, клиническая ремиссия	
5	муж.	11	Спастическая гемиплегия	Левосторонний гемипарез
			Другие расстройства психологического (психического) развития	
			Гиперметропия	
6	жен.	10	Спастическая гемиплегия	Левосторонний гемипарез
			Расстройство психологического (психического) развития неуточненное	
			Другие виды генерализованной эпилепсии и эпилептических синдромов. Электрический статус медленного сна	
7	муж.	16	Спастический церебральный паралич	Правосторонний гемипарез
8	муж.	12	Детская гемиплегия	Правосторонний гемипарез
			Структурная фокальная эпилепсия, ремиссия. Состояние после резекции кортикальной дисплазии левой лобно-центрально-теменной области от сентября 2017 г. Фокальная кортикальная дисплазия, тип IIb (LAE)	
			Генетическая эпилепсия. Общая интеллектуальная недостаточность	
			Состояние после операции Колемана слева	
9	муж.	10	Последствие внутричерепной травмы	Правосторонний гемипарез
10	жен.	12	Детский церебральный паралич	Спастическая диплегия
11	муж.	12	Детский церебральный паралич	Правосторонний гемипарез
			Структурная фокальная эпилепсия	
			Региональная корковая дисплазия. Состояние после функциональной гемисферотомии слева	
			Легкое когнитивное расстройство в связи с эпилепсией	
			Атрофия зрительного нерва	
12	жен.	16	Спастический церебральный паралич	Левосторонний гемипарез
13	муж.	13	Детский церебральный паралич	Спастическая диплегия
14	жен.	19	Детский церебральный паралич	Спастическая диплегия

кистей, закрепленные на подлокотниках кресла. На расстоянии 1–1,5 м перед пациентом располагали монитор, на котором находился кружок для фиксации взора и подавали зрительные инструкции по выполнению следующих заданий: кинестетически вообразить раскрытие левой или правой кисти либо спокойно сидеть, расслабившись. Консультации нейропсихолога проводили в случаях, если: 1) ребенок недостаточно мотивирован на участие в процедуре; 2) наблюдаются выраженные трудности с пониманием инструкции на представление движения; 3) имеет место выраженный дефицит внимания; 4) у ребенка отмечаются выраженные страхи и/или панические атаки во время проведения процедуры. В этих случаях диагностировали причины возникших трудностей и проводили тренировку кинестетических образов и процессов представления движения.

Для того чтобы облегчить непростую для ребенка задачу кинестетического воображения движения и сделать ее более понятной, использовали подсказки, упрощающие инициацию возникновения образов представления движения (табл. 2). При этом учитывали возраст ребенка,

его интересы, а также уровень сформированности когнитивных функций.

В случае наличия у ребенка когнитивного дефицита рекомендовано использовать метафоры, предложенные для предыдущей возрастной категории. При выраженной тенденции к общей рассеянности внимания, повышенной переключаемости на побочные ассоциации и при нарушении целенаправленности деятельности разъяснения максимально упрощали и сокращали, используя короткие и четкие формулировки.

В процессе выполнения заданий регистрировали электроэнцефалограмму (ЭЭГ), что позволяло классификатору комплекса определять, какую пациент выполняет задачу. Результат классификации предъявляли в виде зрительной и проприоцептивной обратной связи: если распознавалось выполнение той задачи, которая соответствовала предъявленной инструкции, то цвет кружка на экране монитора изменялся с белого на зеленый, а экзоскелет осуществлял раскрытие кисти.

ЭЭГ регистрировали при помощи прибора NVX52 («Медицинские компьютерные системы»; Россия), входящего

в состав комплекса «Экзокисть-2». 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. Сигнал фильтровали при помощи фильтра Баттерворта с полосой пропускания 5–30 Гц, а также режекторного фильтра, подавляющего наводку от электросети в 50 Гц. Для распознавания выполняемой задачи использовался Байесовский классификатор [19], основанный на анализе ковариационных матриц ЭЭГ.

Тренировки на воображение движения проходили в течение 7–10 дней, по 2–3 процедуры ежедневно. Длительность каждой процедуры составляла 6,5 мин, что примерно в 1,5 раза короче сессий, проводимых для взрослых постинсультных пациентов [8]. Перерыв между процедурами составлял 5 мин.

Точность управления ИМК оценивали на основе ответов классификатора системы. Ответы позволяли получить матрицу ошибок G для каждой сессии. Число строк и столбцов каждой матрицы было равно числу распознаваемых задач (трем в данном исследовании). Элемент  $g_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ ) служил для оценки вероятности распознавания задачи с номером  $i$ , в случае когда предъявляли инструкцию  $j$ . Среднее значение диагональных элементов этой матрицы являлось оценкой средней вероятности правильного распознавания, т. е. точности управления ИМК.

Отфильтрованные записи ЭЭГ, полученные во время процедур, дополнительно обрабатывали с целью оценить величину десинхронизации  $\mu$ -ритма во время воображения движения. Для каждой записи производили анализ независимых компонент при помощи метода AMICA (Adaptive Mixture Independent Component Analysis) [20]. Использовали именно этот метод как наиболее информативный с точки зрения поиска физиологически значимых источников ЭЭГ [21, 22].

При разложении сигнала на независимые компоненты задавали две статистические модели, что позволило автоматически выделить участки записей с артефактами, возникшими при движении ребенка в кресле. Эти участки были исключены из анализа. Для оставшихся участков исследовали топографические карты найденных независимых компонент, чтобы выделить те из них, которые соответствовали источникам  $\mu$ -ритма в левом и правом полушарии. Степень десинхронизации  $\mu$ -ритма оценивали по формуле  $100\% \cdot (v_{base} - v_{act})/v_{base}$ , где  $v_{act}$  — это дисперсия активности компоненты во время воображения контралатеральной руки, а  $v_{base}$  — дисперсия активности этой компоненты в покое.

В случае, когда источник  $\mu$ -ритма идентифицировать не удавалось, вместо активности источника брали активность, оцененную при помощи LCMV бимформинга [23] на основе усредненной топографической карты,

полученной для источника  $\mu$ -ритма соответствующей локализации в других сессиях.

Для оценки состояния ДФ пациентов использовали общепринятые клинические шкалы: Fugl-Meyer, Action Research Arm Test (ARAT) и Jebsen-Taylor. По шкале Fugl-Meyer анализировали суммы баллов, использованных для оценивания ДФ проксимальных отделов руки, кисти, и общую сумму баллов, использованных для оценивания активных движений руки. По шкале ARAT анализировали шаровой, цилиндрический и щипковый захваты, а также крупные движения руки. По шкале Jebsen-Taylor анализировали время выполнения семи двигательных тестов: написание простого предложения, переворачивание карточек, сбор мелких предметов, имитацию процесса кормления, способность поставить шашки друг на друга, переставить легкие банки, переставить тяжелые банки. Все семь тестов шкалы Jebsen-Taylor выполняли как правой, так и левой рукой.

С помощью гониометрической линейки измеряли максимальные значения суставных углов кисти руки при выполнении активных движений в лучезапястном суставе, а также в пястно-фаланговых и межфаланговых суставах всех пальцев. Все клинические тесты пациенты выполняли перед началом процедур и после их проведения.

Статистический анализ данных клинических шкал включал в себя сравнение показателей, полученных до и после процедур, по критерию Уилкоксона, тесту ANOVA, критерию Стьюдента, и в сравнении приращения показателей клинических шкал по критерию знаков с нулевым уровнем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Управление ИМК

Средняя вероятность правильного распознавания воображаемых движений и состояния покоя во время сессий составила 0,51 (0,45; 0,54) ( $\max = 0,70$ ). Источники  $\mu$ -ритма, в полушарии, контралатеральном сохранной руке, были идентифицированы в 72,0% (61; 84) сессиях, а источники  $\mu$ -ритма в полушарии, контралатеральном паретичной руке, встречались в 64% (45; 80) сессиях. В случаях би- и тетра-парезов «сохранной» считали руку, для которой были достигнуты лучшие показатели по шкале Jebsen-Taylor. На рис. 1А и 1Б представлены топографические карты источников  $\mu$ -ритма, усредненные по всем участникам и записям, в которых они выделялись.

Зависимость точности управления ИМК от средней встречаемости источников была достоверной (рис. 1В). Высокая доля сессий, в которых источники  $\mu$ -ритма удалось идентифицировать, характеризует участников, наиболее эффективно управлявших ИМК.

Таблица 2. Примеры подсказок для облегчения процесса представления движения

Возраст	7–10 лет	10–13 лет	13–18 лет
Пример установок	Представь, что ты тянешься за цветочком и хочешь его сорвать/хочешь взять машинку/хочешь поймать бабочку/взять свою любимую игрушку	Представь, что ты управляешь роботом «силой мысли» /открываешь сундук с сокровищами/ шкатулку с драгоценностями	Представь, что ты тянешься к ручке двери, чтобы ее открыть/протягиваешь руку другу для приветствия/срываешь яблоко с дерева
			Также допустимо использование конкретных кинестетических образов: «Твоя рука сжата в кулак. Постепенно пальцы начинают отрываться от ладони, почувствуй, как они выпрямляются, расслабляются и образуют прямую линию»

Величина десинхронизации  $\mu$ -ритма для полушария, контрлатерального сохранной руке, составила 12% (7; 23) (max = 51%), а для полушария, контрлатерального паретичной руке, — 11% (6.5; 17) (max = 31%). Соответствующие средние значения были равны 18,6% и 13,4%, разница между ними была достоверна (ANOVA:  $p = 0,0018$ ;  $t$ -тест:  $p < 10^{-4}$ ). Таким образом, воображение движения паретичной рукой вызывает более слабую десинхронизацию  $\mu$ -ритма в контрлатеральном полушарии.

Показана достоверность зависимости точности управления ИМК от степени десинхронизации  $\mu$ -ритма, как для полушария, контрлатерального сохранной руке (рис. 1Г), так и для полушария, контрлатерального паретичной руке (рис. 1Д). Эта зависимость показывает, что чем больше десинхронизация ритма при воображении движения как сохранной, так и паретичной руки, тем выше точность управления ИМК.

### Улучшения двигательной функции

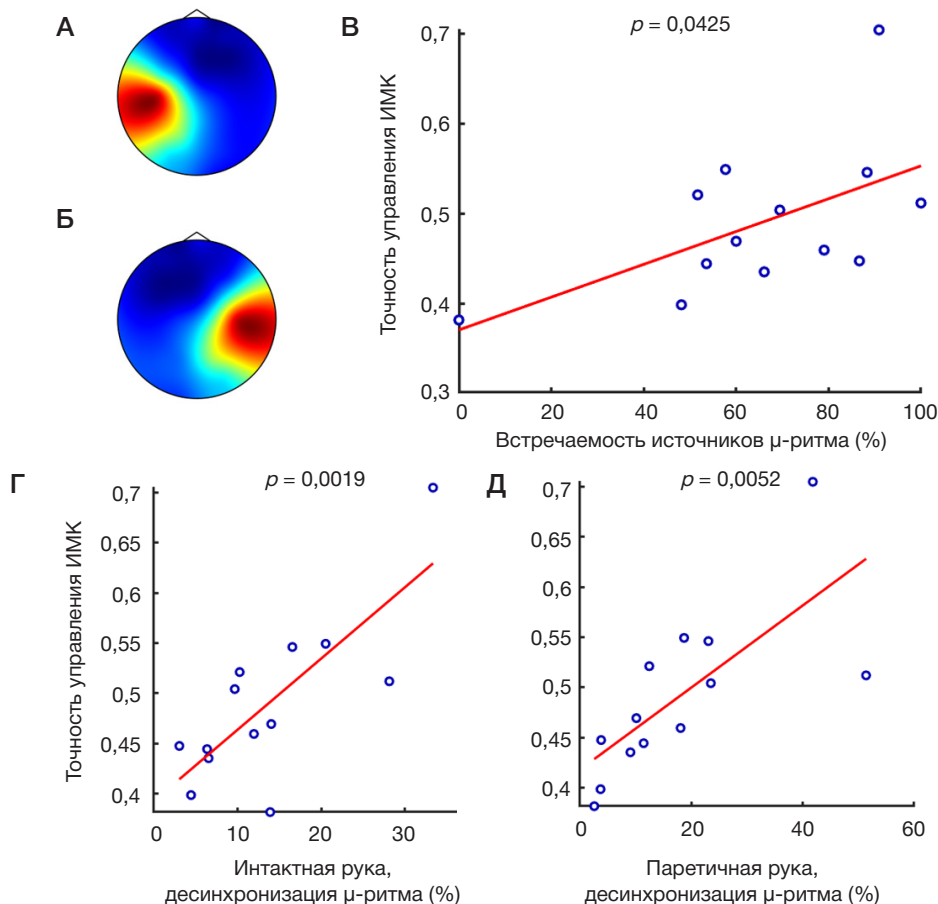
Достоверное приращение параметров по критерию знаков с нулевым уровнем, свидетельствующих об улучшении ДФ после процедур, получено для всех разделов шкалы Fugl-Meyer — проксимального отдела руки, кисти и суммы баллов по всем активным движениям (табл. 3). Для шкалы ARAT достоверное приращение имело место для шарового и цилиндрического захватов, а также для суммы баллов по всем тестам. Для щипкового захвата и крупных движений руки приращение значений параметров после процедур было статистически недостоверным (см. табл. 3).

Выполнение тестов шкалы Jebsen-Taylor паретичной рукой вызывало большие трудности: до процедур время их выполнения превышало 2 мин для всех пациентов. После процедур только двое детей смогли закончить меньше чем за 2 мин один тест из семи и трое — два теста из семи. Все пациенты успешно выполняли тесты сохранной рукой, и после процедур время выполнения уменьшалось для всех тестов, кроме теста «написание простого предложения». Для тестов «перестановка легких банок», «перестановка тяжелых банок» и «имитация процесса кормления» уменьшение времени выполнения после процедур было статистически достоверно отлично от нуля по критерию знаков (табл. 4).

Из рассматриваемых активных движений паретичной рукой амплитуда активных движений увеличилась только для тыльного разгибания с  $30^\circ$  ( $25^\circ$ ;  $41,25^\circ$ ) до  $40^\circ$  ( $40^\circ$ ;  $58,75^\circ$ ). Приращение амплитуды оказалось достоверно больше нуля ( $p = 0,016$  по критерию знаков).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тренировки кинестетического воображения движения считают эффективным способом восстановления ДФ и все чаще используют в клинической практике восстановления движений после инсульта [5, 6]. Работы по исследованию воображения движения у детей, как здоровых, так и страдающих ДЦП, немногочисленны. В них показано, что способность к воображению движений формируется с 5 до 12 лет, и этой способностью обладают дети не только с нормальным развитием [15, 24], но



**Рис. 1.** Топография источников  $\mu$ -ритма и показатели точности управления ИМК. **А.** Усредненная топография источника  $\mu$ -ритма в левом полушарии. **Б.** Усредненная топография источника  $\mu$ -ритма в правом полушарии. **В.** Зависимость точности управления ИМК от встречаемости источников  $\mu$ -ритма по всем участникам исследования. **Г.** Зависимость точности управления ИМК от степени десинхронизации  $\mu$ -ритма в полушарии, контрлатеральном сохранной руке. **Д.** Зависимость точности управления ИМК от степени десинхронизации  $\mu$ -ритма в полушарии, контрлатеральном паретичной руке

Таблица 3. Медианы, квартили и уровень значимости показателей состояния ДФ по шкалам Fugl-Meyer и ARAT до и после процедур

Шкала (двигательные тесты)	До	После	Разность	$p_{\text{wilcoxon}}$	$p_{\text{anova}}$	$p_{\text{diff}}$
Fugl-Meyer (Проксимальные отделы руки)	20,5 (15; 25)	26 (22; 27)	4,5 (1; 6)	0,13	0,27	<b>0,032*</b>
Fugl-Meyer (Кисть)	6 (2; 12)	9,5 (5; 17)	2,5 (0; 5)	0,24	0,28	<b>0,031*</b>
Fugl-Meyer (Сумма по всем активным движениям)	27 (18; 32)	34,5 (26; 43)	7 (2; 11)	0,19	0,25	<b>0,022*</b>
ARAT (Шаровой захват)	11 (3; 24)	13 (3; 36)	1,5 (0; 12)	0,62	0,34	<b>0,008*</b>
ARAT (Цилиндрический захват)	8 (3; 13)	9,5 (6; 21)	1,5 (0; 8)	0,43	0,34	<b>0,018*</b>
ARAT (Щипковый захват)	0,5 (0; 13)	3,5 (0; 18)	0 (0; 3)	0,63	0,56568	0,16
ARAT (Крупные движения руки)	7 (4; 16)	9 (4; 16)	0 (0; 1)	0,63	0,63	0,063
ARAT (Сумма баллов)	31,5 (12; 76)	42 (15; 110)	7,5 (1; 31)	0,33	0,37	<b>&lt; 10<sup>-3</sup>*</b>

Таблица 4. Медианы, квартили (в секундах) и уровень значимости показателей состояния ДФ по шкале Jebsen-Taylor до и после процедур

Двигательный тест	До	После	Разность	$p_{\text{wilcoxon}}$	$p_{\text{anova}}$	$p_{\text{diff}}$
Написание простого предложения	18 (11,25; 29,75)	24 (14,10; 48,25)	0 (-1,50; 3,70)	0,45	0,41	0,36
Переорачивание карточек	6 (4,00; 8,50)	5 (3,00; 7,75)	0 (-1,25; 0,86)	0,44	0,97	0,40
Сбор мелких предметов	9 (6,00; 11,00)	7 (6,50; 13,75)	-0,06 (-2,00; 1,25)	0,88	1,00	0,90
Имитация процесса кормления	11 (8,50; 15,25)	10 (6,50; 13,00)	-1 (-5,66; 0,00)	0,41	0,27	<b>0,0469*</b>
Выставление шашек друг на друга	9 (7,75; 16,25)	9 (6,75; 15,75)	-1 (-4,13; 0,25)	0,57	0,91	0,21
Перестановка легких банок	5 (4,50; 9,25)	4 (3,00; 7,25)	-1 (-2,00; 0,00)	0,38	0,44	<b>0,0039*</b>
Перестановка тяжелых банок	6 (4,00; 9,25)	5 (4,00; 7,50)	-1 (-2,00; 0,00)	0,43	0,45	<b>0,0117*</b>

и с ДЦП [16–18]. Полученные данные подтверждают эти результаты: средняя вероятность распознавания классификатором ЭЭГ предлагаемых в процедуре состояний (раскрытие правой и левой кисти, отдых) составила 0,51, а максимальная — 0,70, что выше 0,33 — уровня случайной вероятности распознавания трех состояний. Однако вероятность распознавания 0,51 меньше средней вероятности распознавания у взрослых — 0,6 по данным, полученным у 37 здоровых испытуемых и 32 постинсультных больных [8].

Возраст пациентов, включенных в исследование воображения движений у детей с ДЦП, находился в том же диапазоне, что и в нашей работе: 11–16 лет [17], 9–14 лет [18] или был еще ниже: 5–9 лет [16]. Критерий же исключения в этих работах был значительно более жестким: исключали пациентов с грубым парезом, с дистонией, с когнитивными нарушениями. Пациенты, включенные в наше исследование, имели серьезные нарушения ДФ (см. табл. 1). Тем не менее все они успешно управляли ИМК: источники  $\mu$ -ритма в полушарии, контралатеральном сохранной руке, были идентифицированы в большинстве сессий. Эти результаты находятся в соответствии с полученными ранее данными о равно успешном воображении движения у детей с левосторонним и правосторонним ДЦП [17].

Следует отметить, что обнаруженная в нашей работе зависимость точности управления ИМК от степени десинхронизации  $\mu$ -ритма не является тривиальным результатом, поскольку классификатор системы работает с ковариационными матрицами сигнала и на его ответ могут потенциально влиять различные источники электрической активности, в том числе и артефактной природы [25]. Полученный результат показывает, что тренировки с ИМК действительно вызывают специфичную по отношению к выполняемой задаче активацию первичных сенсомоторных областей, что и является одной из главных целей процедуры.

Существенные нарушения ДФ у детей с ДЦП связаны со слабостью мышц, повышенным мышечным тонусом,

спастичностью, сенсорным дефицитом [26]. Тренировки воображения движения у детей с ДЦП, направленные на стимуляцию процессов нейропластичности, способствуют восстановлению ДФ как самостоятельная терапия [16, 18], так и в сочетании с другими методами реабилитации [17]. Клинические шкалы Fugl-Meyer и ARAT, использованные в нашем исследовании, показали приращение показателей, свидетельствующее об улучшении ДФ. Несмотря на неоднородность группы пациентов по возрасту, диагнозу, латерализации поражения (см. табл. 1), по некоторым двигательным тестам это приращение было статистически достоверным (см. табл. 3). Шкалы Fugl-Meyer и ARAT общеприняты в клинической практике при оценке нарушения ДФ, несмотря на неизбежную субъективность. Надежность их суммарных оценок основана на большом количестве двигательных тестов, которые были разработаны для взрослых пациентов [27]. Наблюдения врачей, проводивших тестирование наших пациентов, подтверждают, что для детей с ДЦП такое тестирование бывает утомительным, а это снижает надежность оценки ДФ.

В отличие от шкал Fugl-Meyer и ARAT, шкала Jebsen-Taylor основана на объективных измерениях времени выполнения двигательных тестов. Тяжелые нарушения ДФ у пациентов, включенных в исследование, не позволили им выполнить тесты этой шкалы до процедур, а после процедур лишь пять пациентов из 14 смогли выполнить некоторые тесты. Однако время выполнения тестов сохранной рукой уменьшилось для всех тестов, кроме одного, и для четырех тестов из семи было статистически достоверно (см. табл. 4). Как известно, моторный дефицит характерен не только для паретичной, но и для сохранной руки [28]. Несмотря на то что расстройство моторики сохранной руки существенно меньше, чем паретичной, оно может значительно ограничивать функциональную активность пациента, особенно в случае тяжелых поражений. В процедурах комплекса ИМК–экзоскелет происходит произвольная активация как сохраненных структур поврежденного полушария,

так и структур сохранного полушария. Такая билатеральная активация, воздействуя на функциональность обеих рук, способствует эффективности процедур.

Для более точной и объективной оценки ДФ применяются биомеханический анализ движений, зарегистрированных до и после восстановительного лечения. Для постинсультных больных такой анализ широко применяют в клинических исследованиях [29]. Для детей с ДЦП возможные протоколы регистрации движений, а также выбор надежных биомеханических параметров оценки ДФ находятся на стадии разработки [30].

## Литература

- Himmelmann K, Hagberg G, Uvebrant PAP. The changing panorama of cerebral palsy in Sweden. X. Prevalence and origin in the birth-year period 1999–2002. *Acta Paediatrica*. 2010; 99 (9): 1337–43.
- Семенова К. А. Восстановительное лечение детей с перинатальным поражением нервной системы и детским церебральным параличом. М.: Изд-во «Закон и порядок», 2007; 616 с.
- Frolov AA, Husek D, Biryukova EV, Bobrov PD, Mokienko OA, Alexandrov AV. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*. 2017; 27 (1): 107–37.
- Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*. 1999; 110 (11): 1842–57. Epub 1999/11/27. PubMed PMID: 10576479.
- Héту S, Gregoire M, Saimpont A, Coll M-P, Eugene F, Michon P-E, et al. The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2013; 37 (5): 930–49.
- Monge-Pereira E, Ibañez-Pereda J, Alguacil-Diego I, Serrano J, Spottorno-Rubio M, Molina-Rueda F. Use of Electroencephalography Brain-Computer Interface Systems as a Rehabilitative Approach for Upper Limb Function After a Stroke: A Systematic Review. *PM&R*. 2017; 9 (9): 918–32.
- Ang KK, Chua KSG, Phua KS, Wang C, Chin ZY, Kuah CWK, et al. A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke. *Clinical EEG and neuroscience*. 2015; 46 (4): 310–20.
- 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. *Frontiers in neuroscience*. 2017; 11: 400.
- Ono T, Shindo K, Kawashima K, Ota N, Ito M, Ota T, et al. Brain-computer interface with somatosensory feedback improves functional recovery from severe hemiplegia due to chronic stroke. *Frontiers in neuroengineering*. 2014; 7: 19.
- Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, Läer L, Yilmaz Ö, Brasil FL, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of neurology*. 2013; 74 (1): 100–8.
- Eyre JA. Corticospinal tract development and its plasticity after perinatal injury. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2007; 31 (8): 1136–49.
- Thelen E. Developmental 'movement disorders' and problem solving. In: What are 'normal movements' in atypical populations? *Behavioral and Brain Sciences*. 1996; 19 (1): 55–106.
- Allred RP, Jones TA. Maladaptive effects of learning with the less-affected forelimb after focal cortical infarcts in rats. *Experimental Neurology*. 2008; 210 (1): 172–81.
- Duarte NAC, Grecco LAC, Zanon N, Galli M, Fregni F, Oliveira CS. Motor cortex plasticity in children with spastic cerebral palsy: a systematic review. *Journal of Motor Behavior*. 2016; 49 (4): 1–10.
- Spruijt S, van der Kamp J, Steenbergen B. The ability of 6- to 8-year-old children to use motor imagery in a goal-directed pointing task. *Journal of Experimental Child Psychology*. 2015; 139: 221–33.
- Lust JM, Wilson PH, Steenbergen B. Motor imagery difficulties in children with cerebral palsy: A specific or general deficit? *Research in Developmental Disabilities*. 2016; 57: 102–11.
- Cabral-Sequeira AS, Coelho DB, Teixeira L. Motor imagery training promotes motor learning in adolescents with cerebral palsy: comparison between left and right hemiparesis. *Experimental Brain Research*. 2016; 234 (6): 1515–24.
- Errante A, Bozzetti F, Sghedoni S, Bressi B, Costi S, Crisi G, et al. Explicit motor imagery for grasping actions in children with spastic unilateral cerebral palsy. *Frontiers in neurology*. 2019; 10: 837.
- Бобров П. Д., Коршаков А. В., Рошин В. Ю., Фролов А. А. Байесовский подход к реализации интерфейса мозг-компьютер, основанного на представлении движений. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2012; 62 (1): 89–99.
- Palmer JA, Kreuz-Delgado K, Makeig S. AMICA: An adaptive mixture of independent component analyzers with shared components. *Swartz Center for Computational Neuroscience, University of California San Diego, Tech Rep*. 2012.
- Delorme A, Palmer J, Onton J, Oostenveld R, Makeig S. Independent EEG sources are dipolar. *PloS one*. 2012; 7 (2): e30135.
- Frolov A, Bobrov P, Biryukova E, Isaev M, Kerechanin Y, Bobrov D, et al. Using Multiple Decomposition Methods and Cluster Analysis to Find and Categorize Typical Patterns of EEG Activity in Motor Imagery Brain-Computer Interface Experiments. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020; 7 (88). DOI: 10.3389/frobt.2020.00088.
- Van Hoey G, Van de Walle R, Vanrumste B, D'Havse M, Lemahieu I, Boon P. Beamforming techniques applied in EEG source analysis. *Proc ProRISC99*. 1999; 10: 545–9.
- Crognier L, Skoura X, Vinter A, Papaxanthis C. Mental representation of arm motion dynamics in children and adolescents. *PloS one*. 2013; 8: e73042.
- Фролов А., Азиатская Г., Бобров П., Люкманов Р., Федотова И., Гусек Д., и др. Электрофизиологическая активность мозга при управлении интерфейсом мозг-компьютер, основанным на воображении движений. *Физиология человека*. 2017; 43 (5): 17–28.
- Klingels K, Demeyere I, Jaspers E, De Cock P, Molenaers G, Boyd R, et al. Upper limb impairments and their impact on activity measures in children with unilateral cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*. 2012; 16 (5): 475–84.
- Gladstone DJ, Daniells CJ, Black SE. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: A critical review of its measurement properties. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2002; 16 (232–240).
- Sunderland A. Recovery of ipsilateral dexterity after stroke. *Stroke*. 2000; 31 (2): 430–3.
- Alt Murphy MA, Häger CK. Kinematic analysis of the upper extremity after stroke — how far have we reached and what have we grasped? *Physical Therapy Reviews*. 2015; 20: 137–55.
- Mailleux L, Simon-Martinez C, Feys H, Jaspers E. Upper extremity movement pathology during functional tasks. In: Müller B, Wolf S, editors. *Handbook of Human Motion*. Cham: Springer International Publishing AG, 2018; p. 1167–1184.

## Выводы

Процедура ИМК-экзоскелет кисти — эффективное многообещающее средство восстановления ДФ у детей с ДЦП, потенциально пригодное для дополнения основной терапии. Все пациенты, включенные в исследование, успешно справлялись с управлением ИМК, несмотря на различия в возрасте, латерализации и тяжести поражения ДФ. Показано, что управление ИМК вызывает специфичную активацию первичных сенсомоторных областей, в том числе и в пораженном полушарии.

## References

- Himmelman K, Hagberg G, Uvebrant PAP. The changing panorama of cerebral palsy in Sweden. X. Prevalence and origin in the birth-year period 1999–2002. *Acta Paediatrica*. 2010; 99 (9): 1337–43.
- Semenova KA. Vosstanovitel'noe lechenie detej s perinatal'nym porazheniem nervnoj sistemy i detskim cerebral'nym paralichom. M.: Izd-vo «Zakon i porjadok», 2007; 616 s. Russian.
- Frolov AA, Husek D, Biryukova EV, Bobrov PD, Mokienko OA, Alexandrov AV. Principles of motor recovery in post-stroke patients using hand exoskeleton controlled by the brain-computer interface based on motor imagery. *Neural Network World*. 2017; 27 (1): 107–37.
- Pfurtscheller G, Lopes da Silva FH. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*. 1999; 110 (11): 1842–57. Epub 1999/11/27. PubMed PMID: 10576479.
- Héту S, Gregoire M, Saimpont A, Coll M-P, Eugene F, Michon P-E, et al. The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2013; 37 (5): 930–49.
- Monge-Pereira E, Ibañez-Pereda J, Alguacil-Diego I, Serrano J, Spottorno-Rubio M, Molina-Rueda F. Use of Electroencephalography Brain-Computer Interface Systems as a Rehabilitative Approach for Upper Limb Function After a Stroke: A Systematic Review. *PM&R*. 2017; 9 (9): 918–32.
- Ang KK, Chua KSG, Phua KS, Wang C, Chin ZY, Kuah CWK, et al. A randomized controlled trial of EEG-based motor imagery brain-computer interface robotic rehabilitation for stroke. *Clinical EEG and neuroscience*. 2015; 46 (4): 310–20.
- 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. *Frontiers in neuroscience*. 2017; 11: 400.
- Ono T, Shindo K, Kawashima K, Ota N, Ito M, Ota T, et al. Brain-computer interface with somatosensory feedback improves functional recovery from severe hemiplegia due to chronic stroke. *Frontiers in neuroengineering*. 2014; 7: 19.
- Ramos-Murguialday A, Broetz D, Rea M, Lâer L, Yilmaz Ö, Brasil FL, et al. Brain-machine interface in chronic stroke rehabilitation: a controlled study. *Annals of neurology*. 2013; 74 (1): 100–8.
- Eyre JA. Corticospinal tract development and its plasticity after perinatal injury. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2007; 31 (8): 1136–49.
- Thelen E. Developmental 'movement disorders' and problem solving. In: What are 'normal movements' in atypical populations? *Behavioral and Brain Sciences*. 1996; 19 (1): 55–106.
- Allred RP, Jones TA. Maladaptive effects of learning with the less-affected forelimb after focal cortical infarcts in rats. *Experimental Neurology*. 2008; 210 (1): 172–81.
- Duarte NAC, Grecco LAC, Zanon N, Galli M, Fregni F, Oliveira CS. Motor cortex plasticity in children with spastic cerebral palsy: a systematic review. *Journal of Motor Behavior*. 2016; 49 (4): 1–10.
- Spruijt S, van der Kamp J, Steenbergen B. The ability of 6- to 8-year-old children to use motor imagery in a goal-directed pointing task. *Journal of Experimental Child Psychology*. 2015; 139: 221–33.
- Lust JM, Wilson PH, Steenbergen B. Motor imagery difficulties in children with cerebral palsy: A specific or general deficit? *Research in Developmental Disabilities*. 2016; 57: 102–11.
- Cabral-Sequeira AS, Coelho DB, Teixeira L. Motor imagery training promotes motor learning in adolescents with cerebral palsy: comparison between left and right hemiparesis. *Experimental Brain Research*. 2016; 234 (6): 1515–24.
- Errante A, Bozzetti F, Sghedoni S, Bressi B, Costi S, Crisi G, et al. Explicit motor imagery for grasping actions in children with spastic unilateral cerebral palsy *Frontiers in neurology*. 2019; 10: 837.
- Bobrov PD, Korshakov AV, Roshhin VYu, Frolov AA. Bajesovskij podhod k realizacii interfejsa mozg-komp'juter, osnovannogo na predstavlenii dvizhenij. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti*. 2012; 62 (1): 89–99. Russian.
- Palmer JA, Kreutz-Delgado K, Makeig S. AMICA: An adaptive mixture of independent component analyzers with shared components. Swartz Center for Computational Neuroscience, University of California San Diego, Tech Rep. 2012.
- Delorme A, Palmer J, Onton J, Oostenveld R, Makeig S. Independent EEG sources are dipolar. *PLoS one*. 2012; 7 (2): e30135.
- Frolov A, Bobrov P, Biryukova E, Isaev M, Kerechanin Y, Bobrov D, et al. Using Multiple Decomposition Methods and Cluster Analysis to Find and Categorize Typical Patterns of EEG Activity in Motor Imagery Brain-Computer Interface Experiments. *Frontiers in Robotics and AI*. 2020; 7 (88). DOI: 10.3389/frobt.2020.00088.
- Van Hoey G, Van de Walle R, Vanrumste B, D'Havse M, Lemahieu I, Boon P. Beamforming techniques applied in EEG source analysis. *Proc ProRISC99*. 1999; 10: 545–9.
- Crognier L, Skoura X, Vinter A, Papaxanthis C. Mental representation of arm motion dynamics in children and adolescents. *PLoS one*. 2013; 8: e73042.
- Frolov A, Aziatskaya G, Bobrov P, Lyukmanov R, Fedotova I, Gusek D, i dr. Jelektrofiziologicheskaja aktivnost' mozga pri upravlenii interfejsom mozg-komp'juter, osnovannym na voobrazhenii dvizhenij. *Fiziologija cheloveka*. 2017; 43 (5): 17–28. Russian.
- Klingels K, Demeyere I, Jaspers E, De Cock P, Molenaers G, Boyd R, et al. Upper limb impairments and their impact on activity measures in children with unilateral cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*. 2012; 16 (5): 475–84.
- Gladstone DJ, Daniells CJ, Black SE. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: A critical review of its measurement properties. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2002; 16 (232–240).
- Sunderland A. Recovery of ipsilateral dexterity after stroke. *Stroke*. 2000; 31 (2): 430–3.
- Alt Murphy MA, Häger CK. Kinematic analysis of the upper extremity after stroke — how far have we reached and what have we grasped? *Physical Therapy Reviews*. 2015; 20: 137–55.
- Mailleux L, Simon-Martinez C, Feys H, Jaspers E. Upper extremity movement pathology during functional tasks. In: Müller B, Wolf S, editors. *Handbook of Human Motion*. Cham: Springer International Publishing AG, 2018; p. 1167–1184.