

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЭГ В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ α -РИТМА У ДЕТЕЙ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ ТЕРАПИИ

Н. В. Ларина, М. А. Начарова, Л. Л. Корсунская, С. В. Власенко, В. Б. Павленко ✉

Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

Курс нейрореабилитации с применением комплекса «неинвазивный интерфейс мозг–компьютер и экзоскелет кисти» в сочетании с традиционным курортным лечением приводит у детей с ДЦП к значимому улучшению показателей движений, однако характеристики ЭЭГ не были проанализированы. Целью работы было определить особенности реактивности ЭЭГ пациентов в частотном диапазоне α -ритма при прохождении курса из 10 сеансов роботизированной терапии. ЭЭГ регистрировали в 21 отведении в условиях покоя и кинестетического воображения движений разгибания пальцев рук у 32 детей обоего пола в возрасте 10–18 лет, имеющих диагноз «лево- и правосторонний гемипарез». Во время первого сеанса паттерны реактивности α -ритма при воображении движений у групп детей с лево- и правосторонним гемипарезом различались, причем различия достигали статистической значимости в отведении P2 при воображении движений левой кисти ($F_{1,30} = 5,10; p < 0,05$). Паттерн реактивности α -ритма во время десятого сеанса отличался замещением реакций синхронизации в ряде отведений на десинхронизацию, что свидетельствует об увеличении активации неокортекса. Наиболее выраженными были изменения ЭЭГ у детей с левосторонним гемипарезом ($F_{20,300} = 1,84; p < 0,05$). По завершении курса степень различия показателей ЭЭГ у пациентов с лево- и правосторонним гемипарезом уменьшилась. Выявленные перестройки паттерна ЭЭГ в частотной полосе α -ритма можно рассматривать как проявление процессов благоприятной реорганизации нейронных цепей, контролирующей планирование и выполнение сложных движений рук.

Ключевые слова: детский церебральный паралич, ЭЭГ, нейрореабилитация, интерфейс мозг–компьютер, воображение движения

Финансирование: исследование выполнено в рамках темы: «Разработка комплекса экзоскелета кисти с внешним программным управлением и биологической обратной связью для процедуры реабилитации детей с синдромом ДЦП» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (RFMEFI60519X0186).

Вклад авторов: Ларина Н. В., Корсунская Л. Л., Власенко С. В. — набор данных, написание статьи; Начарова М. А., Павленко В. Б. — обработка данных, написание статьи.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом КФУ им. В. И. Вернадского (протокол № 53 от 06 декабря 2018 г.). Все пациенты или их законные представители подписали добровольное информированное согласие.

✉ **Для корреспонденции:** Владимир Борисович Павленко
пр. Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007; vpav55@gmail.com

Статья получена: 16.06.2020 **Статья принята к печати:** 02.07.2020 **Опубликована онлайн:** 16.07.2020

DOI: 10.24075/vrgmu.2020.043

CHANGES IN EEG PATTERNS IN THE α -FREQUENCY BAND FOLLOWING BCI-BASED THERAPY IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY

Larina NV, Nacharova MA, Korsunskaya LL, Vlasenko SV, Pavlenko VB ✉

Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

It was demonstrated previously that neurorehabilitation with the noninvasive BCI-controlled robotic device combined with conventional therapeutic modalities resulted in significant motor improvement in children with cerebral palsy. However, EEG records were not analyzed in the previous study. The aim of this paper was to describe the reactivity patterns of the EEG α -rhythm during a series of 10 BCI-based neurorehabilitation sessions. The study was carried out in 32 boys and girls aged 10 to 18 years with right- or left-side hemiparesis. EEG was recorded from 21 electrodes at rest and during kinesthetic imagery of finger extension. During the first session, patterns of α -rhythm reactivity during motor imagery differed between patients with left- and right-side hemiparesis. The differences were statistically significant at P2 during left hand movement rehearsal ($F_{1,30} = 5.10; p < 0.05$). During the final session, the pattern of α -rhythm reactivity was different: synchronization was taken over by desynchronization at some electrode sites, suggesting increased activity of the neocortex. The most conspicuous EEG changes were observed in children with left-side hemiparesis ($F_{20,300} = 1.84; p < 0.05$). By the end of the rehabilitation course, the differences between patients with left- and right-side hemiparesis became much less pronounced. Rearrangements in the EEG patterns in the α -frequency band can be regarded as signs of beneficial reorganization of neural circuits responsible for planning and executing complex hand movements.

Keywords: cerebral palsy, EEG, neurorehabilitation, brain-computer interface, motor imagery

Funding: the study was part of the state-funded project RFMEFI60519X0186 on the *Development of a BCI-based hand exoskeleton with biological feedback for the rehabilitation of children with cerebral palsy*. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

Author contribution: Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV — data acquisition, manuscript preparation; Nacharova MA, Pavlenko VB — data analysis, manuscript preparation.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of Vernadsky Crimean Federal University (Protocol № 53 dated December 06, 2018). Informed consent was obtained from the patients or their legal representatives.

✉ **Correspondence should be addressed:** Vladimir B. Pavlenko
Pr. Vernadskogo, 4, Simferopol, 295007; vpav55@gmail.com

Received: 16.06.2020 **Accepted:** 02.07.2020 **Published online:** 16.07.2020

DOI: 10.24075/brsmu.2020.043

В большинстве развитых стран детский церебральный паралич (ДЦП) является наиболее распространенной причиной инвалидности, возникающей в раннем детстве. ДЦП поражает примерно 1 из 500 новорожденных, в

мире им страдает около 17 млн человек [1]. Термин «ДЦП» объединяет группу хронических непрогрессирующих симптомокомплексов двигательных нарушений (спастических параличей, гиперкинетического, церебеллярного

атактического, псевдобульбарного синдромов), основная причина которых в нарушении развития или повреждении головного мозга в антенатальном, интранатальном или неонатальном возрастных периодах. Двигательные дисфункции часто сочетаются с умственной отсталостью, эпилептическими припадками, трудностями восприятия, общения и обучения [2]. В связи с разнообразием клинических проявлений ДЦП существующие медикаментозные и физиотерапевтические методы помощи таким детям не всегда эффективны. Один из перспективных методов коррекции двигательных нарушений — применение комплексов реабилитации, состоящих из неинвазивных интерфейсов мозг–компьютер (ИМК) и роботизированных устройств с биологической обратной связью [3]. Работа комплексов основана на распознавании намерений пациента по изменению паттерна его ЭЭГ при кинестетическом воображении движений и запуске движений экзоскелета. Предполагается [4], что предоставление дополнительной информации с помощью роботизированных ортезов повышает качество лечения: пациент получает обратную связь об успешности представления движения, а усиление тактильной, проприоцептивной и зрительной афферентации дополнительно активирует структуры головного мозга, лишенные или ограниченные в получении сенсорной информации вследствие поражения мозга. Показана эффективность указанной технологии при реабилитации больных, перенесших инсульт [5, 6].

Несмотря на то что ряд авторов [7, 8] указывают на обширные перспективы использования ИМК в реабилитации детей с ДЦП, в настоящее время исследования в этой области единичны. Так, при работе с пациентами, имеющими диагноз ДЦП, показана потенциальная возможность применения ИМК на основе анализа динамики сенсомоторного ритма ЭЭГ [9]. Выполнение большими заданиями на кинестетическое представление движений приводило к таким изменениям мощности μ - и β -ритмов ЭЭГ, которые адекватно оценивала программа-классификатор. В другой работе использовали ИМК, выявляющий изменения отношения мощности β - и θ -ритмов при представлении пациентом разгибания кисти и запускающей электростимуляцию мышц разгибателей запястья [10]. После серии таких сеансов у детей с ДЦП было выявлено улучшение параметров движений рук.

Для коррекции двигательных функций верхних конечностей у детей с ДЦП был применен комплекс ИМК-экзоскелет кисти [11]. Авторы работы испытывали комплекс на фоне санаторно-курортного лечения в специализированном санатории. В результате курса нейрореабилитации у большинства детей снизилась спастичность мышц кисти, увеличилась сила мышц и объем движений кисти, вырос репертуар бытовых навыков. У пациентов, получавших только традиционное санаторно-курортное лечение, была обнаружена лишь тенденция к увеличению объема бытовых навыков, но положительные изменения не были статистически значимыми. В указанной публикации динамику ЭЭГ детей в процессе применения роботизированного комплекса не анализировали.

В контексте анализа активности ЦНС в процессе реабилитационных мероприятий у пациентов с двигательными нарушениями особый интерес представляет изучение реактивности α -ритма и его разновидности — μ -ритма. Эти ритмы при выполнении человеком различных видов деятельности демонстрируют связанную с событиями десинхронизацию или синхронизацию. Параметры реактивности α -ритма ЭЭГ используют в качестве индикатора вовлеченности различных областей

неокортекса здоровых испытуемых в процессы переработки разномодальной информации [12], а μ -ритма — в качестве индикатора активации соматосенсорной и моторной зон коры при выполнении и представлении движений [13, 14]. Поскольку указанные ритмы имеют схожий частотный диапазон, а при выполнении задач на представление движений в этот диапазон вносит свой вклад и частично сохраняющийся при открытых глазах затылочный α -ритм, отличающийся высокой реактивностью при выполнении когнитивной деятельности [15], в дальнейшем, употребляя по отношению к результатам нашего исследования термин « α -ритм» или словосочетание «активность в частотном диапазоне α -ритма», мы подразумеваем, что эта активность является результатом генерации и α - и μ -ритма.

У перенесших инсульт пациентов при представлении движений выявлены изменения указанных ритмов, заключающиеся в их как синхронизации, так и десинхронизации [16]. Паттерн таких реакций менялся после курса реабилитации с использованием ИМК, управляющего экзоскелетом кисти. Авторы указанной публикации высказали предположение, что такие изменения отражают реорганизацию нейронных цепей в процессе нейрореабилитации. Необходимо подчеркнуть, что у детей с ДЦП особенности реактивности α - и μ -ритмов в процессе курса нейрореабилитации изучены недостаточно.

Целью исследования было определить особенности реактивности ЭЭГ в частотном диапазоне α -ритма в процессе реабилитации детей с ДЦП, имеющих нарушение функций верхней конечности, на основе применения комплекса «неинвазивный ИМК-экзоскелет кисти с биологической обратной связью».

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика выборки

Работу проводили на базе специализированного отделения для психоневрологических больных Евпаторийского военного детского клинического санатория имени Е. П. Глинки. В исследовании приняли участие пациенты в возрасте 10–18 лет, проходящие курс санаторно-курортной реабилитации с применением комплекса «неинвазивный ИМК-экзоскелет кисти» («Экзокисть-2») производства консорциума: Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, НПО «Андроидная техника» (Россия). Критерии включения пациентов: наличие установленного синдромного диагноза «ДЦП» в соответствии с критериями МКБ-10; наличие у пациента в структуре неврологических нарушений гемипареза с уровнем двигательной активности не выше III по критериям классификации больших моторных функций (Gross Motor Function Classification System for Cerebral Palsy, GMFCS). Критерии исключения: уровень двигательной активности по критериям GMFCS больше III; наличие пlegии верхней конечности; афатические нарушения; медикаментозно некорректируемая эпилепсия; нарушения зрения, не позволяющие различать инструкцию на экране; умственная отсталость умеренной, тяжелой и глубокой степеней (F71–73 по МКБ-10).

В итоговую выборку вошли 32 пациента, которые были направлены на санаторно-курортный этап восстановительного лечения с установленным диагнозом ДЦП. Больные были разделены на две группы: имеющие диагноз левосторонний гемипарез (16 испытуемых;

10 мужского, 6 женского пола) и правосторонний гемипарез (16 испытуемых: 9 мужского, 7 женского пола). Из них 21 пациент по критериям классификации больших моторных функций (GMFCS) имел II уровень двигательной активности и 11 пациентов — III уровень. Возраст детей составил 10–12 лет (11 человек), 13–15 лет (12 человек) и 16–18 лет (9 человек). Средний возраст испытуемых — $13,6 \pm 2,5$ лет. Достоверных различий по возрасту между группами не было.

Реабилитационные мероприятия, регистрация и анализ ЭЭГ

Работа ИМК основана на анализе паттернов ЭЭГ, возникающих при воображении движений. Для этого применяли классификатор, анализирующий ковариационные матрицы сигналов ЭЭГ с применением метода Байеса [17].

Во время тренировок пациенты сидели в кресле на расстоянии полутора метров от компьютерного монитора, на котором им предъявляли визуальные инструкции. Кисти рук размещали внутри «рукавиц» экзоскелета. В центре экрана находились округлая метка белого цвета, служившая для фиксации взгляда, и три стрелки вокруг нее, менявшие цвет для обозначения инструкций. Пациент выполнял следующие команды: расслабиться (в течение 10 с активировалась верхняя стрелка); кинестетически воображать движение левой или правой руки (в течение 10 с активировалась левая или правая стрелка соответственно). При точном выполнении пациентом задания фиксирующая взор метка окрашивалась в зеленый цвет, экзоскелет выполнял соответствующее движение и кисть руки пассивно разгибалась. Таким образом, генерировался комбинированный зрительный и кинестетический сигнал обратной связи.

Пациенты проходили курс из 10 сеансов (один сеанс через день) по одинаковой схеме: три сессии по 8 мин с перерывом на отдых не менее 5 мин. В течение сеанса ситуацию воображения движений каждой руки повторяли 24 раза. Больные в течение 21 дня получали также комплексное санаторно-курортное лечение по стандартным методикам [11]: лечебную физкультуру, массаж паретичных мышц, пелоидотерапию, гидрокинезиотерапию в термальной воде, электростимуляцию мышц, являющихся антагонистами паретичным.

ЭЭГ регистрировали монополярно с помощью электроэнцефалографа «Нейровизор БММ» («Медицинские Компьютерные Системы»; Россия) в лобных (Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F1, F2, F3, F4), центральных (Cz, C1, C2, C3, C4), теменных (Pz, P1, P2, P3, P4) и затылочных (Oz, O1, O2) отведениях, расположенных по неполной международной схеме 10–10. В качестве референтного использовали объединенный ушной электрод. В процессе записи частоты среза фильтров высоких и низких частот составляли 5 и 30 Гц соответственно, частота оцифровки ЭЭГ-сигналов — 500 Гц.

При обработке ЭЭГ из анализа исключали участки записей с амплитудой более 250 мкВ, а также отрезки, содержащие большое количество артефактов, связанных с активацией ЭЭГ мышц лба. Для анализа отбирали безартефактные 10-секундные фрагменты ЭЭГ во время воображения движений правой либо левой рукой и во время расслабленного бодрствования с открытыми глазами («фон»). Для одного сеанса количество таких фрагментов составляло 10–15 для каждой ситуации. Указанные фрагменты ЭЭГ подвергали быстрому преобразованию Фурье с эпохой анализа 2,5 с и взаимным

перекрытием эпох 50%. Применяли сглаживание окном Блэкмана. Для каждого 10-секундного отрезка записи рассчитывали среднюю амплитуду α -ритма в полосе частот 8–13 Гц и индексы реактивности (ИР) в соответствии с формулой: $ИР = 100\% \times [(B - A) / A]$, где B — средняя амплитуда α -ритма во время представления движений в течение 10 с, A — средняя амплитуда α -ритма в фоновой ситуации, предшествующей представлению движений. Для ситуаций воображения движений левой и правой рук, по фрагментам ЭЭГ, зарегистрированным в течение сеанса, средние арифметические значений ИР рассчитывали отдельно.

Положительные значения ИР свидетельствуют об увеличении амплитуды α -ритма во время представления движений по сравнению с фоновым уровнем (синхронизация), а отрицательные — об ее уменьшении (десинхронизация). Для дальнейшего анализа использовали усредненные ИР для первого и десятого сеансов тренинга.

Статистическая обработка данных

Статистический анализ данных проводили с использованием пакета STATISTICA 10.0 (StatSoft Inc.; США). Применение критерия Шапиро–Уилка показало, что распределение значений ИР α -ритма в исследуемых отведениях не отличалось от нормального. Это позволило использовать для обработки данных дисперсионный анализ с повторными измерениями (repeated measures ANOVA). По схеме $2 \times 2 \times 21$ оценивали влияние межсубъектного фактора ГРУППА (принадлежность к группе испытуемых с лево- или правосторонним гемипарезом), а также двух внутрисубъектных факторов: РУКА (представление движений левой и правой руками) и ЛОКУС (21 отведение ЭЭГ). Изменения у пациентов реактивности α -ритма в результате прохождения курса лечения анализировали с помощью ANOVA с внутрисубъектными факторами СЕАНС (первый и десятый), РУКА и ЛОКУС. Для оценки изменений ИР в каждом из локусов ЭЭГ применяли метод априорных контрастов (оценка F-распределения). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$, но в связи с небольшим объемом выборки учитывали и тенденции к наличию различий ($p < 0,10$).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее нами было показано, что в результате проведенного комплексного санаторно-курортного лечения с применением комплекса «неинвазивный ИМК-экзоскелет кисти» у детей с ДЦП значимо улучшились характеристики движений верхних конечностей [11]. У пациентов, получавших только традиционное санаторно-курортное лечение, положительные изменения не были статистически значимыми. ЭЭГ этих пациентов не регистрировали.

Реактивность α -ритма в начале курса реабилитации

Во время первого сеанса роботизированной терапии у пациентов при воображении движений были выявлены разнонаправленные изменения амплитуды α -ритма (рис. 1, 2, красные столбцы). В большинстве отведений обоих полушарий была выявлена его синхронизация. Паттерны изменений α -ритма различались у групп детей с право- и левосторонним гемипарезом. Близкое к статистически значимому влияние оказывало взаимодействие факторов ГРУППА \times РУКА \times ЛОКУС ($F_{20, 600} = 1,45$; $p = 0,09$).

Применение метода априорных контрастов показало, что при воображении разгибания пальцев левой кисти (рис. 1) различия достигали статистической значимости в правом теменном отведении P2 ($F_{1,30} = 5,10; p < 0,05$). В этом локусе при представлении движений левой рукой у детей с левосторонним гемипарезом выявлена выраженная синхронизация α -ритма ЭЭГ (рис. 1А), тогда как у испытуемых с правосторонним гемипарезом — лишь незначительные его изменения (рис. 1Б).

Применение метода априорных контрастов показало, что при воображении движений правой рукой у детей с правосторонним гемипарезом выявлена тенденция к большей синхронизации α -ритма в отведении P2 ($F_{1,30} = 2,81; p = 0,10$) по сравнению с пациентами, у которых паретичной рукой была левая (рис. 2А, Б).

Реактивность α -ритма при завершении курса реабилитации

Паттерн реактивности α -ритма, выявленный у пациентов во время завершающего десятого сеанса, отличался от такового в начале курса реабилитации.

Для группы детей с левосторонним гемипарезом выявлено значимое влияние взаимодействия факторов СЕАНС \times РУКА \times ЛОКУС ($F_{20,300} = 1,84; p < 0,05$). Во время представления движений паретичной рукой реакцию синхронизации α -ритма ЭЭГ, наблюдаемую ранее в отведениях Fp1, Fp2, P2, Oz, к концу тренировок сменила реакция десинхронизации (см. рис. 1А). Различия показателей ИР первого и десятого сеансов достигали уровня статистической значимости в отведениях P2 ($F_{1,15} = 10,02; p < 0,01$) и Oz ($F_{1,15} = 7,68; p < 0,05$) и приближались к нему в отведении Fp1 ($F_{1,15} = 3,96; p = 0,07$). Во время воображения движений правой рукой у детей с левосторонним гемипарезом значимые различия в реактивности α -ритма выявлены в отведении С1 ($F_{1,15} = 6,57; p < 0,05$). После проведения тренировок реакция

десинхронизации α -ритма сменилась на синхронизацию (см. рис. 2А).

У испытуемых с правосторонним гемипарезом различия ИР α -ритма при представлении движений правой и левой рукой во время первого и последнего сеансов не достигали уровня статистической значимости (см. рис. 1Б, 2Б), взаимодействие факторов ТРЕНИНГ \times РУКА \times ЛОКУС не оказывало значимого влияния на различия ($F_{20,300} = 0,86; p = 0,64$).

После прохождения курса тренировок степень различия показателей реактивности α -ритма при воображении движений рук у детей с левосторонним и правосторонним гемипарезом уменьшилась — влияние взаимодействия факторов ГРУППА \times РУКА \times ЛОКУС стало далеким от значимого ($F_{20,600} = 0,88; p = 0,61$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании проанализированы изменения ЭЭГ в процессе нейрореабилитации функций пациентов с ДЦП при применении комплекса ИМК. Следует отметить, что степень изменения амплитуды ЭЭГ в частотном диапазоне α -ритма у детей с ДЦП при воображении движений рук оказалась неожиданно невысокой. В большинстве отведений значения ИР не превышали 3%. Одной из причин ограниченного уровня реактивности может быть тот факт, что для больных с ДЦП характерен нетипичный вид модуляции ритмов ЭЭГ. У таких пациентов при выполнении движений отмечено снижение реакций как десинхронизации, так и синхронизации μ -ритма по сравнению с реакциями здоровых детей, четкая локализация реакций отсутствует, изменения ЭЭГ можно наблюдать в самых разных областях неокортекса, включая теменную и затылочную область [18–20]. Кроме того, несмотря на то что от пациентов требовалось воображать движение непрерывно в течение 10 с, изменения амплитуды α -ритма могли быть нестабильными.

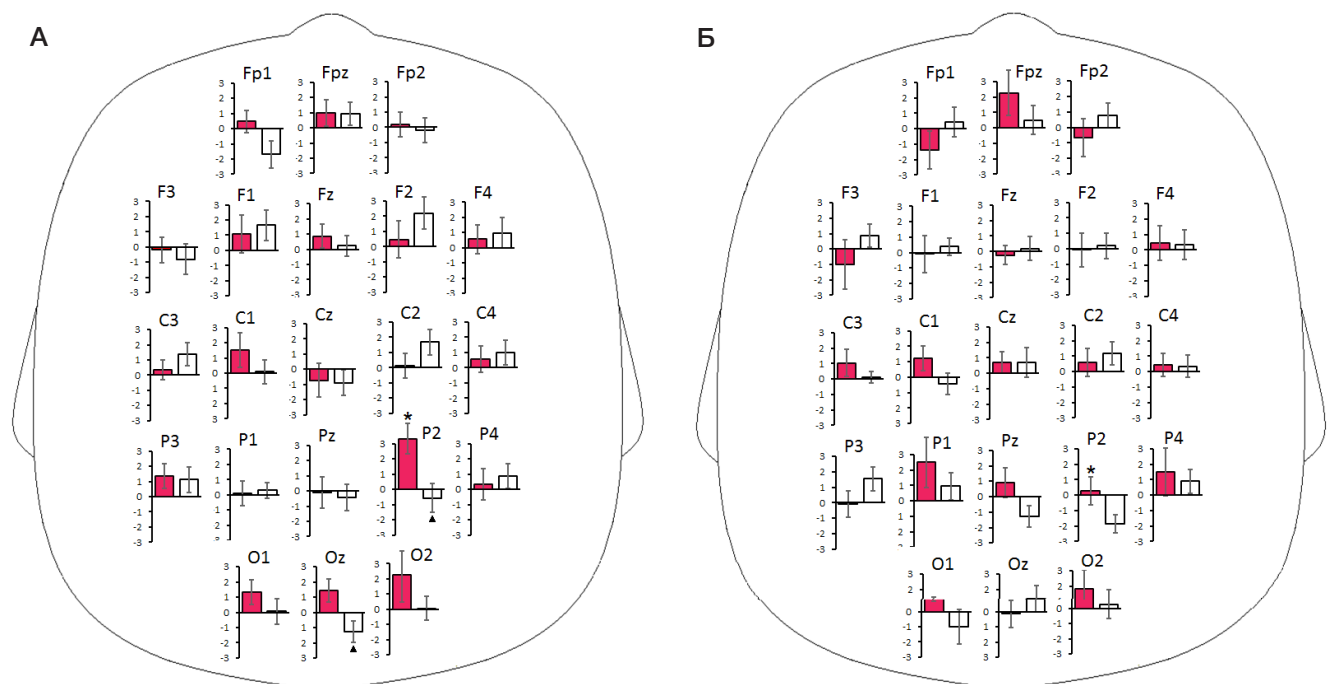


Рис. 1. Индексы реактивности α -ритма ЭЭГ (%) в группах детей с левосторонним (А) и правосторонним (Б) гемипарезом при представлении движений левой рукой во время первого сеанса (красные столбцы) и завершающего, десятого сеанса (белые столбцы) курса реабилитации с использованием роботизированного комплекса. Приведены средние значения и ошибки средних. Различия индексов реактивности у детей двух групп: * — $p < 0,05$; между показателями сеансов: ▲ — $p < 0,05$

У здоровых взрослых испытуемых изменения μ -ритма при воображении движений носили многофазный характер с чередующимися фазами синхронизации и десинхронизации [14]. Смена чередовавшихся эпизодов десинхронизации/синхронизации μ - и α -ритмов отмечена также во время воображения движений у взрослых пациентов, проходящих процедуру реабилитации после инсульта с помощью роботизированной терапии [16]. Нельзя исключить, что поскольку в настоящей работе амплитуду ЭЭГ оценивали за весь период воображения движений, реакции связанной с событиями десинхронизации/синхронизации в значительной мере нивелировались.

Обращает на себя внимание и билатеральный паттерн реакций α -ритма при воображении движений. Рост или падение амплитуды указанного ритма были отмечены не только в контра-, но и в ипсилатеральном, по отношению к руке, полушарии, разгибание пальцев которой представлял испытуемый. Такие нетипичные двусторонние паттерны моторной активации у детей с ДЦП выявлены и другими авторами [21]. Указанная группа исследователей с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии оценивали активацию структур ЦНС при выполнении испытуемыми движений (сжатие пальцами мячика), а также регистрировали ответы мышц руки на транскраниальную магнитную стимуляцию. Результаты работы привели авторов к выводу, что более чем у половины обследованных детей, страдающих ДЦП, паретичную конечность контролирует либо ипсилатеральное, либо оба полушария. Такую необычную мозговую организацию можно расценивать как носящую компенсаторный характер и развивающуюся благодаря пластичности нервной системы после повреждения головного мозга в раннем возрасте.

Особенность настоящего исследования — участие в нем двух групп пациентов: с право- и левосторонним гемипарезом. Она позволило сравнить ЭЭГ-реакции предположительно относительно сохранного и серьезно поврежденного полушарий при представлении движений

одной, левой или правой, рукой. В начале курса нейрореабилитации паттерны изменений α -ритма при воображении движений одноименных конечностей различались у детей указанных групп. Различия ИР достигали уровня статистической значимости в теменной области правого полушария (отведение P2). После прохождения тренингов степень различия показателей реактивности α -ритма при воображении движений рук у детей с лево- и правосторонним гемипарезом уменьшилась, что может свидетельствовать об определенных благоприятных перестройках активности ЦНС.

В основе таких изменений лежит прежде всего статистически значимое изменение паттерна реактивности ЭЭГ в частотной полосе α -ритма у пациентов с левосторонним гемипарезом к концу курса тренингов. Если во время первого сеанса при воображении движений паретичной рукой у детей этой группы заметную десинхронизацию (ИР более 0,25%) наблюдали только в одном отведении (Cz), то во время десятого сеанса — в шести отведениях обоих полушарий (см. рис. 1А). Хотя изменение паттерна реактивности ЭЭГ у детей с правосторонним гемипарезом к концу курса реабилитации не достигло уровня статистической значимости, у них также отмечался рост десинхронизации α -ритма. Если во время первого сеанса при воображении движений паретичной рукой десинхронизация отсутствовала во всех отведениях ЭЭГ, то во время завершающего сеанса она проявилась в шести отведениях, главным образом ипсилатерального полушария (см. рис. 2Б). Увеличение доли реакций связанной с событием десинхронизации α -ритма указывает на рост активации неокортекса у пациентов в результате курса нейрореабилитации [12–14]. Особый интерес представляет рост десинхронизации в отведении P2 (см. рис. 1А, Б). Сигнал ЭЭГ в данном отведении отражает активность нейронных сетей предклинья (precuneus) [22]. Предклинья отводят центральную роль в широком спектре высокоинтегрированных задач, включая

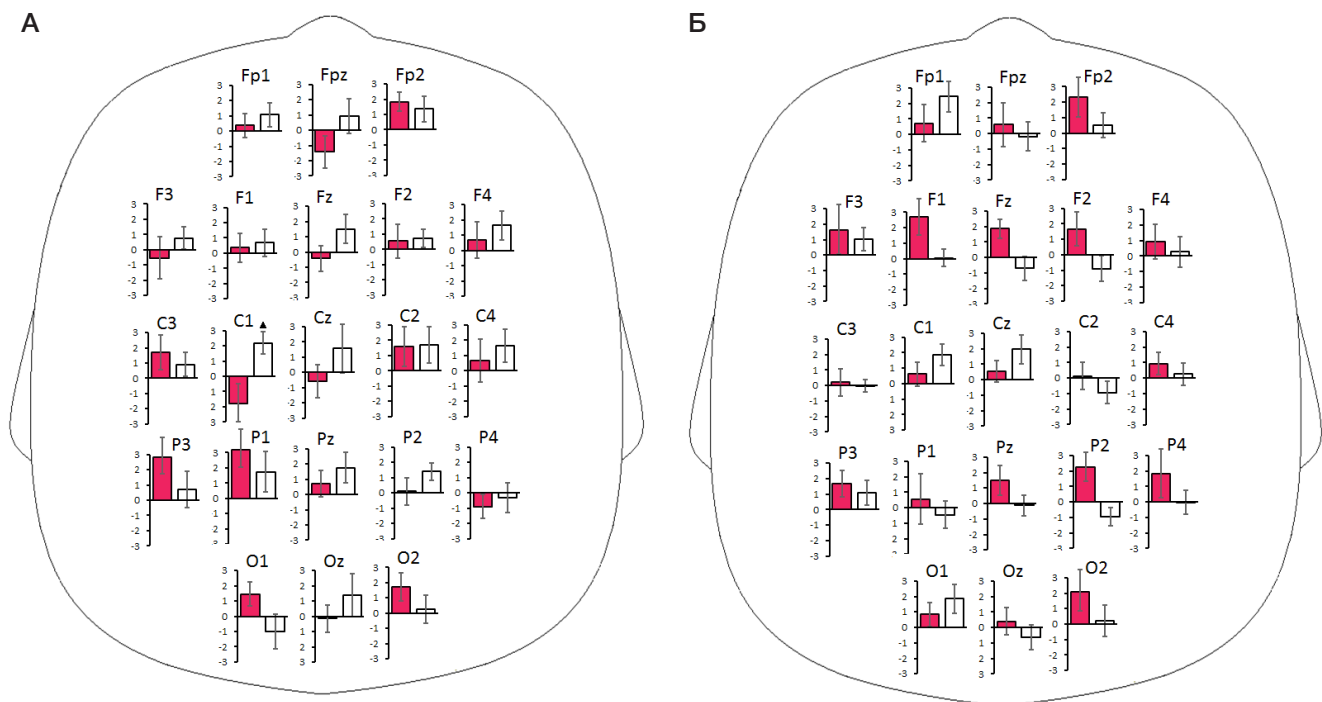


Рис. 2. Индексы реактивности α -ритма ЭЭГ в группе детей с левосторонним (А) и правосторонним (Б) гемипарезом при представлении движений правой рукой во время первого сеанса и завершающего, десятого сеанса курса реабилитации с использованием роботизированного комплекса. Обозначения те же, что для рис. 1

формирование пространственных образов движений и восприятие пространственной перспективы от первого лица [23]. Повышение степени активации данной области в результате курса нейрореабилитации может играть одну из ключевых ролей в оптимизации планирования и выполнения сложных движений руки у пациентов, улучшении бытовых навыков.

Усиление десинхронизации в ряде регионов неокортекса сопровождал рост связанной с событием синхронизации α -ритма в других корковых областях. Так, у детей с левосторонним гемипарезом во время завершающего сеанса заметно значительное увеличение амплитуды α -ритма при воображении разгибания пальцев паретичной руки в области первичной моторной (C2, C4) и премоторной коры (F2, F4). Мы рассматриваем такие изменения в частотной полосе α -ритма в указанных областях как свидетельство процесса активного торможения, направленного на предотвращение чрезмерного вовлечения пораженного контралатерального полушария в контроль двигательной активности ребенка.

Поскольку в результате курса нейрореабилитации у детей с ДЦП значительно улучшились двигательные функции [11], выявленные нами перестройки паттерна ЭЭГ в частотном диапазоне α -ритма можно рассматривать как проявление процессов благоприятной реорганизации нейронных цепей. Данное исследование носит во многом предварительный характер. Мы не можем исключить влияние на паттерн реактивности ЭЭГ факторов традиционного санаторно-курортного лечения. В дальнейшем планируется применить рандомизированный перекрестный дизайн для оценки влияния на реактивность α -ритма не только курса нейрореабилитации, но и указанных факторов, а также проанализировать связь

между показателями изменений ЭЭГ и улучшением у детей двигательных функций. Считаем, что настоящее и планируемые исследования помогут наметить новые подходы к повышению эффективности комплексного санаторно-курортного лечения.

ВЫВОДЫ

Нейрореабилитация детей, страдающих ДЦП, с применением комплекса «неинвазивный интерфейс мозг–компьютер и экзоскелет кисти» приводит не только к значимому улучшению характеристик движений верхних конечностей, но и к перестройке паттерна реактивности α -ритма пациентов при воображении движений рук. В начале курса нейрореабилитации паттерны изменений α -ритма при воображении движений одноименных конечностей у детей с лево- и правосторонним гемипарезом значительно различались. После прохождения тренингов степень различия показателей реактивности α -ритма у детей указанных групп уменьшилась, что может свидетельствовать об определенных благоприятных перестройках активности ЦНС. В основе таких изменений лежит прежде всего статистически значимое изменение паттерна реактивности ЭЭГ у пациентов с левосторонним гемипарезом. В целом у детей с лево- и правосторонним гемипарезом выявлено увеличение доли реакций связанной с событием десинхронизации α -ритма, что указывает на рост активации неокортекса в результате курса нейрореабилитации. Выявленные перестройки паттерна ЭЭГ в частотной полосе α -ритма могут быть рассмотрены как проявление усиления процессов пластичности нейронных цепей, контролирующих планирование и выполнение сложных движений рук у пациентов.

Литература

- Graham HK, Rosenbaum P, Paneth N, Dan B, Lin JP, Damiano DL, et al. Cerebral palsy. *Nat Rev Dis Primers*. 2016; 2: 15082. DOI: 10.1038/nrdp.2015.82.
- Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, Merrick J. Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Transl Pediatr*. 2020; 9 (Suppl 1): 125–35.
- Фролов А. А., Бобров П. Д. Интерфейс мозг–компьютер: нейрофизиологические предпосылки и клиническое применение. *Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова*. 2017; 67 (4): 365–76.
- Chiew M, LaConte S, Graham S. Investigation of fMRI neurofeedback of differential primary motor cortex activity using kinesthetic motor imagery. *NeuroImage*. 2012; 61 (1): 21–31.
- Котов С. В., Турбина Л. Г., Бобров П. Д., Фролов А. А., Павлова О. Г., Курганская М. Е. и др. Реабилитация больных, перенесших инсульт, с помощью биоинженерного комплекса «интерфейс мозг–компьютер + экзоскелет». *Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова*. 2014; 114 (12–2): 66–72.
- Фролов А. А., Мокиенко О. А., Люкманов Р. Х., Черникова Л. А., Котов С. В., Турбина Л. Г. и др. Предварительные результаты контролируемого исследования эффективности технологии ИМК–экзоскелет при постинсультном парезе руки. *Вестник РГМУ*. 2016; 2: 17–25.
- Ponce P, Molina A, Balderas DC, Grammatikou D. Brain Computer Interfaces for Cerebral Palsy. In: E. Suraka, editor. *Cerebral Palsy challenges for the future*. London: IntechOpen, 2014; p. 245–72. DOI: 10.5772/57084.
- Jochumsen M, Shafique M, Hassan A, Niazi IK. Movement intention detection in adolescents with cerebral palsy from single-trial EEG. *J Neural Eng*. 2018; 15 (6): 066030. DOI: 10.1088/1741-2552/aae4b8.
- Daly I, Billinger M, Laparra-Hernández J, Aloise F, Lloria García M, Faller J, et al. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clin Neurophysiol*. 2013; 124 (9): 1787–97.
- Kim T-W, Lee B-H. Clinical usefulness of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation for improving brain activity in children with spastic cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci*. 2016; 28 (9): 2491–4.
- Ларина Н. В., Корсунская Л. Л., Власенко С. В. Комплекс «Экзокисть-2» в реабилитации верхней конечности при детском церебральном параличе с использованием неинвазивного интерфейса «мозг–компьютер». *Нервно-мышечные болезни*. 2019; 11 (4): 12–20.
- Bazanava OM, Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014; 44: 94–110.
- Pfurtscheller G, Brunner C, Schlögl A, Lopes da Silva FH. Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *NeuroImage*. 2006; 31 (1): 153–9.
- Llanos C, Rodríguez M, Rodríguez-Sabate C, Morales I, Sabate M. Mu-rhythm changes during the planning of motor and motor imagery actions. *Neuropsychologia*. 2013; 51 (6): 1019–26.
- Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends Cogn Sci*. 2012; 16 (12): 606–17.
- Котов С. В., Романова М. В., Кондур А. А., Бирюкова Е. В., Фролов А. А., Турбина Л. Г. и др. Реорганизация биоэлектрической активности неокортекса после инсульта в результате реабилитации с использованием интерфейса «мозг–компьютер», управляющего экзоскелетом кисти. *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*.

- 2020; 70 (2): 217–30.
17. 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 им. И. П. Павлова. 2012; 62 (1): 89–99.
 18. Shin YK, Lee DR, Hwang HJ, You SJ, Im CH. A novel EEG-based brain mapping to determine cortical activation patterns in normal children and children with cerebral palsy during motor imagery tasks. *Neurorehabilitation*. 2012; 31 (4): 349–55.
 19. Inuggi A, Bassolino M, Tacchino C, Pippo V, Bergamaschi V, Campus C, et al. Ipsilesional functional recruitment within lower mu band in children with unilateral cerebral palsy, an event-related desynchronization study. *Exp Brain Res*. 2018; 236 (2): 517–27.
 20. Démas J, Bourguignon M, Pérvier M, De Tiège X, Dinomais M, Van Bogaert P. Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* [Internet]. 2019 June [cited 2019 July 9]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.06.007>.
 21. Weinstein M, Green D, Rudisch J, Benthem M, Zielinski IM, Jongsma MLA, et al. Understanding the relationship between brain and upper limb function in children with unilateral motor impairments: A multimodal approach. *Eur J Paediatr Neurol*. 2018; 22 (1): 143–54.
 22. Koessler L, Maillard L, Benhadid A, Vignal JP, Felblinger J, Vespignani H, et al. Automated cortical projection of EEG sensors: Anatomical correlation via the international 10–10 system. *NeuroImage*. 2009; 46 (1): 64–72.
 23. Cavanna AE, Trimble MR. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*. 2006; 12 (30): 564–83.

References

1. Graham HK, Rosenbaum P, Paneth N, Dan B, Lin JP, Damiano DL, et al. Cerebral palsy. *Nat Rev Dis Primers*. 2016; 2: 15082. DOI: 10.1038/nrdp.2015.82.
2. Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, Merrick J. Cerebral palsy in children: a clinical overview. *Transl Pediatr*. 2020; 9 (Suppl 1): 125–35.
3. Frolov AA, Bobrov PD. Interfejs mozg–komp'juter: nejrofiziologicheskije predposylki i klinicheskoe primenenie. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti im. I. P. Pavlova*. 2017; 67 (4): 365–76. Russian.
4. Chiew M, LaConte S, Graham S. Investigation of fMRI neurofeedback of differential primary motor cortex activity using kinesthetic motor imagery. *NeuroImage*. 2012; 61 (1): 21–31.
5. Kotov SV, Turbina LG, Bobrov PD, Frolov AA, Pavlova OG, Kurganskaja ME i dr. Reabilitacija bol'nyh, perenessih insul't, s pomoshh'ju bioizhenernogo kompleksa «interfejs mozg–komp'juter + jekzoskelet». *Zhurnal nevrologii i psihiatrii im. C. C. Korsakova*. 2014; 114 (12–2): 66–72. Russian.
6. Frolov AA, Mokienko OA, Lyukmanov RKh, Chernikova LA, Kotov SV, Turbina LG et al. Preliminary results of a controlled study of BCI–exoskeleton technology efficacy in patients with poststroke arm paresis. *Bulletin of RSMU*. 2016; 2: 16–23.
7. Ponce P, Molina A, Balderas DC, Grammatikou D. Brain Computer Interfaces for Cerebral Palsy. In: E. Suraka, editor. *Cerebral Palsy challenges for the future*. London: IntechOpen, 2014; p. 245–72. DOI: 10.5772/57084.
8. Jochumsen M, Shafique M, Hassan A, Niazi IK. Movement intention detection in adolescents with cerebral palsy from single-trial EEG. *J Neural Eng*. 2018; 15 (6): 066030. DOI: 10.1088/1741-2552/aae4b8.
9. Daly I, Billinger M, Laparra-Hernández J, Aloise F, Lloria García M, Faller J, et al. On the control of brain-computer interfaces by users with cerebral palsy. *Clin Neurophysiol*. 2013; 124 (9): 1787–97.
10. Kim T-W, Lee B-H. Clinical usefulness of brain-computer interface-controlled functional electrical stimulation for improving brain activity in children with spastic cerebral palsy: a pilot randomized controlled trial. *J Phys Ther Sci*. 2016; 28 (9): 2491–4.
11. Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV. The “Exo hand-2” complex in the rehabilitation of the upper limb in cerebral palsy using the non-invasive interface “brain-computer”. *Neuromuscular diseases*. 2019; 11 (4): 12–20. Russian.
12. Bazanova OM, Vernon D. Interpreting EEG alpha activity. *Neurosci Biobehav Rev*. 2014; 44: 94–110.
13. Pfurtscheller G, Brunner C, Schlögl A, Lopes da Silva FH. Mu rhythm (de)synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks. *NeuroImage*. 2006; 31 (1): 153–9.
14. Llanos C, Rodríguez M, Rodríguez-Sabate C, Morales I, Sabate M. Mu-rhythm changes during the planning of motor and motor imagery actions. *Neuropsychologia*. 2013; 51 (6): 1019–26.
15. Klimesch W. Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends Cogn Sci*. 2012; 16 (12): 606–17.
16. Kotov SV, Romanova MV, Kondur AA, Biryukova EV, Frolov AA, Turbina LG i dr. Reorganizacija bioelektricheskoi aktivnosti neokorteksa posle insul'ta v rezul'tate reabilitacii s ispol'zovaniem interfejsa «mozg–komp'juter», upravljajushhego jekzoskeletom kisti. *Zhurnal vysshej nervnoj dejatel'nosti im. I. P. Pavlova*. 2020; 70 (2): 217–30. Russian.
17. 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 im. I. P. Pavlova*. 2012; 62 (1): 89–99. Russian.
18. Shin YK, Lee DR, Hwang HJ, You SJ, Im CH. A novel EEG-based brain mapping to determine cortical activation patterns in normal children and children with cerebral palsy during motor imagery tasks. *Neurorehabilitation*. 2012; 31 (4): 349–55.
19. Inuggi A, Bassolino M, Tacchino C, Pippo V, Bergamaschi V, Campus C, et al. Ipsilesional functional recruitment within lower mu band in children with unilateral cerebral palsy, an event-related desynchronization study. *Exp Brain Res*. 2018; 236 (2): 517–27.
20. Démas J, Bourguignon M, Pérvier M, De Tiège X, Dinomais M, Van Bogaert P. Mu rhythm: State of the art with special focus on cerebral palsy. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine* [Internet]. 2019 June [cited 2019 July 9]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2019.06.007>.
21. Weinstein M, Green D, Rudisch J, Benthem M, Zielinski IM, Jongsma MLA, et al. Understanding the relationship between brain and upper limb function in children with unilateral motor impairments: A multimodal approach. *Eur J Paediatr Neurol*. 2018; 22 (1): 143–54.
22. Koessler L, Maillard L, Benhadid A, Vignal JP, Felblinger J, Vespignani H, et al. Automated cortical projection of EEG sensors: Anatomical correlation via the international 10–10 system. *NeuroImage*. 2009; 46 (1): 64–72.
23. Cavanna AE, Trimble MR. The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*. 2006; 12 (30): 564–83.