

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ641707> EDN: DXZWPZ

# Возможности улучшения речевых функций у детей с церебральным параличом на фоне реабилитации с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи

Д.Р. Хусаинов, Л.Л. Корсунская, С.В. Власенко, Е.А. Бирюкова, Л.С. Орехова

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В исследованиях с применением роботизированных устройств показана их высокая перспективность в реабилитационных мероприятиях, в т. ч. при детском церебральном параличе. Одновременно с функциональным восстановлением моторики кисти отмечается вероятностное улучшение речевых навыков. Указанный феномен требует доказательного экспериментального обоснования и по организации сеансов нейрореабилитации.

**Цель.** Определить влияние сеансов нейротренинга с использованием неинвазивного интерфейса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти» на уровень речевых навыков испытуемых с детским церебральным параличом в зависимости от успешности взаимодействия с нейроинтерфейсом.

**Материал и методы.** Исследование проводили в группе пациентов с диагнозом «детский церебральный паралич и дизартрия»: 18 девочек возрастом  $11,11 \pm 0,69$  года и 30 мальчиков —  $9,5 \pm 0,55$  года;  $p=0,064$ . Одновременно с применением стандартной программы реабилитации выполняли 10 сеансов с использованием комплекса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти». По завершении сеанса автоматически отображался коэффициент успешности взаимодействия пациента с нейроинтерфейсом. Исследование речевых навыков до и после прохождения курса нейрореабилитации (10 сеансов) проводили по методикам: оральный праксис и артикуляция, звукопроизношение и «предложения по картинкам».

В контрольную группу вошли 30 испытуемых (детский церебральный паралич и дизартрия), из которых 12 девочек ( $10,58 \pm 0,69$  года), 18 мальчиков ( $11 \pm 0,65$  года);  $p=0,891$ . Пациенты контрольной группы участвовали только в стандартной программе реабилитации. Статистический анализ осуществляли в GraphPad Prism 8. Нормальность распределения оценивали критерием Шапиро–Уилка. Множественный статистический анализ проводили методом Краскела–Уоллеса и теста Дана. Парное сравнение осуществляли T-критерием Стьюдента, критерием Уилкоксона, критерием Манна–Уитни. Различия считали значимыми при  $p < 0,05$ .

**Результаты.** Пациентов экспериментальной группы разделили на две подгруппы: в 1-й наблюдалось постепенное увеличение коэффициента успешности — «успешные» испытуемые. Во 2-й — значение коэффициента успешности колебалось вблизи фонового уровня (сеанс 1) — «неуспешные» испытуемые. У 12 «успешных» девочек коэффициент успешности на 1-м сеансе составлял 0,33 (0,29; 0,36) на 10-м сеансе — 0,44 (0,43; 0,61);  $p=0,0007$ ; у «успешных» ( $n=19$ ) мальчиков — 0,33 (0,31; 0,39) и на 10-м — 0,50 (0,46; 0,57);  $p=0,0000017$ . Коэффициент успешности «неуспешных» испытуемых не изменялся. «Успешные» испытуемые демонстрировали достоверно больший прирост баллов (2–2,5 по медиане) в методиках оценки речевых навыков как по сравнению с «неуспешными» (0–2 по медиане), так и с контрольными испытуемыми (0–1 по медиане).

**Заключение.** В процессе сеансов нейрореабилитации у испытуемых с возрастающим коэффициентом эффективности наблюдается выраженное улучшение речевых навыков.

**Ключевые слова:** детский церебральный паралич; коэффициент успешности; речевые навыки; роботизированные устройства; биологическая обратная связь.

## Как цитировать:

Хусаинов Д.Р., Корсунская Л.Л., Власенко С.В., Бирюкова Е.А., Орехова Л.С. Возможности улучшения речевых функций у детей с церебральным параличом на фоне реабилитации с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи // Казанский медицинский журнал. 2025. DOI: 10.17816/KMJ641707 EDN: DXZWPZ

DOI: <https://doi.org/10.17816/KMJ641707> EDN: DXZWPZ

# Potential for Improving Speech Function in Children With Cerebral Palsy Through Rehabilitation Using Robotic Devices and Biofeedback

Denis R. Khusainov, Larisa L. Korsunskaya, Sergey V. Vlasenko,  
Elena A. Biryukova, Liliia S. Orekhova

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Studies involving robotic devices have demonstrated high potential in rehabilitation, including children with cerebral palsy. In addition to functional restoration of hand motor skills, a probable improvement in speech abilities were observed. This phenomenon requires evidence-based experimental substantiation, including the organization of neurorehabilitation sessions.

**AIM:** This study aimed to assess the impact of neurotraining sessions using a noninvasive brain-computer-hand exoskeleton interface on the level of speech abilities in children with cerebral palsy, depending on the success of interaction with the neurointerface.

**MATERIAL AND METHODS:** The study included a group of patients diagnosed with cerebral palsy and dysarthria: 18 girls aged  $11.11 \pm 0.69$  years and 30 boys aged  $9.5 \pm 0.55$  years ( $p = 0.064$ ). In addition to the standard rehabilitation program, 10 sessions were conducted using the brain-computer-hand exoskeleton complex. Upon completion of each session, the success coefficient of interaction with the neurointerface was automatically generated. Speech abilities before and after the neurorehabilitation course (10 sessions) were assessed using the following methods: oral praxis and articulation, phoneme pronunciation, and sentences based on pictures. The control group consisted of 30 children with cerebral palsy and dysarthria (12 girls,  $10.58 \pm 0.69$  years; 18 boys,  $11 \pm 0.65$  years;  $p = 0.891$ ). Patients in the control group only participated in the standard rehabilitation program. Statistical analysis was performed using GraphPad Prism 8. The Shapiro-Wilk test was used to assess the normality of distribution. Multiple statistical analysis was performed using the Kruskal-Wallis method and Dunn's test. Pairwise comparisons were performed using the Student t-test, Wilcoxon test, and Mann-Whitney U-test. Differences were considered statistically significant at  $p < 0.05$ .

**RESULTS:** Participants in the experimental group were divided into two subgroups: the first demonstrated a gradual increase in the success coefficient and was classified as "successful." The second subgroup showed variability in values approximating the baseline (session 1) and was classified as "unsuccessful." Among the 12 "successful" girls, the success coefficient increased from 0.33 (0.29; 0.36) at session 1 to 0.44 (0.43; 0.61) at session 10 ( $p = 0.0007$ ); among the 19 "successful" boys—from 0.33 (0.31; 0.39) to 0.50 (0.46; 0.57) ( $p = 0.0000017$ ). No change in the success coefficient was observed in the "unsuccessful" subgroup. The "successful" participants demonstrated a significantly greater median increase (2–2.5 points) in speech assessment scores compared with both "unsuccessful" participants (0–2 points) and controls (0–1 point).

**CONCLUSION:** A significant improvement in speech abilities was observed during neurorehabilitation sessions in participants who showed an increasing success coefficient.

**Keywords:** cerebral palsy; success coefficient; speech; robotic devices; biofeedback.

## To cite this article:

Khusainov DR, Korsunskaya LL, Vlasenko SV, Biryukova EA, Orekhova LS. Potential for improving speech function in children with cerebral palsy through rehabilitation using robotic devices and biofeedback. *Kazan Medical Journal*. 2025. DOI: 10.17816/KMJ641707 EDN: DXZWPZ

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Нарушения речи при детском церебральном параличе (ДЦП) наблюдаются у большого числа пациентов, по данным разных авторов — от 30 до 90% больных, и доминирующим диагнозом является дизартрия [1–3]. В терапии ДЦП используются различные методы, и важное значение имеют методики, направленные на развитие нервной системы и контроля движений [4], в т. ч. роботизированные системы, которые представляются перспективными, но требующими систематизации подходов и программ применения [5]. При этом отмечается наличие взаимосвязи между двигательными функциями, развитием крупной и мелкой моторики, речевыми и другими коммуникативными навыками детей с ДЦП [6]. Указания на сенсомоторную интеграцию речевых функций встречаются в работах различных авторов [7–9], в т. ч. последних лет [10–11]. В предыдущих исследованиях с применением методики «неинвазивный интерфейс мозг — компьютер — экзоскелет кисти» была показана существенная активизация областей мозга, функционально связанных с движениями руки, моторной составляющей речи и когнитивными функциями ребёнка [8–10]. Кроме того, отмечается взаимосвязь сенсомоторных ритмов при электроэнцефалографии (ЭЭГ) с успешностью представления движений [12], т. е. с эффективностью взаимодействия испытуемого с нейроинтерфейсом. В связи с этим нами рассматривается гипотеза, что и улучшение речевых навыков будет наиболее выражено у пациентов, которые демонстрируют высокий уровень успешного взаимодействия с нейроинтерфейсом. Согласно высказанному предположению, в настоящем исследовании мы сформулировали следующую цель: определить влияние сеансов нейротренинга с использованием неинвазивного интерфейса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти» на уровень речевых навыков испытуемых с ДЦП в зависимости от успешности взаимодействия с нейроинтерфейсом.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование проводили с сентября 2023 г. по июнь 2024 г. на базе НКЦ «Технологии здоровья и реабилитации» ФГАУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского» и ГБУ Республики Крым «Санаторий для детей и детей с родителями „Чайка“ им. Гелимовичей» для детей с неврологическими нарушениями.

Исследование проводили в группе пациентов с диагнозом ДЦП (в соответствии с Международной классификацией болезней 10-го пересмотра) и наличием гемипареза с уровнем двигательной активности не выше III по критериям классификации больших моторных функций (Gross Motor Function Classification System for Cerebral Palsy) и с диагнозом «дизартрия».

*Критерии исключения пациентов из эксперимента:*

- уровень двигательной активности по критериям GMFCS больше III;

- афатические нарушения;
- медикаментозно некорректируемая эпилепсия;
- нарушения зрения, не позволяющие различать инструкцию на экране;
- умственная отсталость умеренной, тяжёлой и глубокой степеней (F71–73 по Международной классификации болезней 10-го пересмотра).

Кроме того, осуществляли мониторинг текущего функционального состояния испытуемых с помощью визуального контроля, регулярного опроса (пациентов и их родителей), периодической регистрации основных функциональных показателей, например, артериальное давление, температура тела (ежедневно) и др. Эти мероприятия проводили для предотвращения влияния таких факторов, как простуда, пищевое отравление, психозомоциональных переживаний и других слабо контролируемых факторов на результат исследования.

По завершении исследовательского периода (вторая половина 2023 — первая половина 2024 года) в экспериментальную группу вошли 48 человек в возрасте от 6 до 16 лет: 18 девочек со средним возрастом  $11,11 \pm 0,69$  года и 30 мальчиков со средним возрастом  $9,5 \pm 0,55$  года. В каждой гендерной группе были представлены участники всех возрастов из указанного диапазона. Группы по возрасту не различались ( $p=0,064$ ).

Первичную оценку речевых навыков испытуемых проводили по следующим методикам: оральная праксис и артикуляция (максимальное количество баллов — 30), звукопроизношение (80 баллов) и «предложения по картинкам» (45 баллов) [13]. Тестовые задания формировали с учётом возраста испытуемого. Регистрацию речевых показателей испытуемых выполняли за день до первого сеанса (второй-четвёртый день поступления в санаторий) и на следующий день (13–15-й день нахождения в санатории) после прохождения 10 сеансов курса нейрореабилитации. Сеансы нейрореабилитации выстраивали таким образом, чтобы воскресный (выходной) день выпадал после 5-го сеанса, т. е. цикл делился: 5 сеансов — 1 день перерыв — 5 сеансов.

Каждый испытуемый экспериментальной группы проходил по 10 сеансов реабилитационных процедур с помощью комплекса, включающего неинвазивный интерфейс «мозг — компьютер — экзоскелет кисти» (НИМК) с применением биологической обратной связи (производства ООО «Экзопласт», г. Москва, регистрационное удостоверение на медицинское изделие № РЗН 2018/7681 от 10 октября 2018 г.). Первому сеансу с использованием НИМК с биологической обратной связью предшествовала беседа со всеми испытуемыми по разъяснению стоящей перед ними задачи. Пациентам предлагали визуально и тактильно ознакомиться с установкой, задать вопросы. Непосредственно перед каждым сеансом пациенту кратко поясняли стоящую перед ним задачу, давали установку расслабиться и сосредоточиться на представлении движений — разгибания кисти. Беседу и постановку задачи проводил специалист — медицинский психолог.

Работа НИМК основана на анализе частотно-амплитудных характеристик ЭЭГ, возникающих при воображении разгибания кисти. Программа обеспечивает выявление кинестетического воображения движения на основе анализа ЭЭГ, генерацию визуального сигнала обратной связи и формирование команд управления экзоскелетом кисти руки [10, 14]. Для классификации состояний (воображаемых движений рук и расслабления) использовали различия ковариационных матриц ЭЭГ в терминах римановой метрики [15]. По окончании каждого сеанса отображалось соотношение правильно распознанных классификатором состояний, при которых происходило разгибание экзоскелета кисти к общему числу заданий, результат которого мы обозначили как коэффициент успешности (КУ). Мы полагаем, что это соотношение зависело от способности испытуемого успешно представить себе движение, что совпадает с мнением других исследователей [10].

Одновременно с посещением сеансов нейротренинга испытуемые экспериментальной группы участвовали в стандартной программе реабилитации ГБУ Республики Крым «Санаторий для детей и детей с родителями „Чайка“ им. Гелиовичей» с применением лечебной физической культуры, массажа паретичных мышц, пелоидотерапии, гидрокинезиотерапии в термально-минеральной воде, электростимуляции мышц, являющихся антагонистами паретичным.

Для адекватной оценки экспериментальных воздействий сформирована контрольная группа испытуемых общей численностью 30 человек с диагнозом «ДЦП и дизартрия» в возрасте от 6 до 16 лет, из которых девочек — 12 (средний возраст —  $10,58 \pm 0,69$  года), мальчиков — 18 (средний возраст —  $11 \pm 0,65$  года). Группы по возрасту не различались ( $p=0,891$ ).

При сравнении массива возраста девочек контрольной и экспериментальной групп уровень значимости отличий составил  $p=0,534$ ; мальчиков —  $p=0,066$ ; что указывает на возрастную однотипность испытуемых экспериментальной и контрольной групп.

Все исследовательские мероприятия и манипуляции с контрольными испытуемыми проводили идентично в соответствии с таковыми у экспериментальных пациентов. Отличие заключалось лишь в том, что пациенты контрольной группы не участвовали в сеансах нейрореабилитации и проходили только курс санаторно-курортной программы реабилитации. Речевые навыки пациентов контрольной группы исследовали по идентичным методикам и с соблюдением соответствующего экспериментальной группе временного интервала.

Кроме того, важно отметить, что с испытуемыми всех исследованных групп специальной логопедической работы не проводилось, и, по результатам опроса, включенные в обе группы пациенты не посещали логопедические занятия более чем 6 мес до начала исследования.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы GraphPad Prism 8. Соответствие

распределения данных закону Гаусса оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. При наличии нормального (гауссовского) распределения количественные данные представлены в виде среднего значения и стандартной ошибки среднего ( $M \pm SE$ ). В случае ненормального распределения числовые показатели приведены в виде медианы и квартилей —  $Me (Q1; Q3)$ .

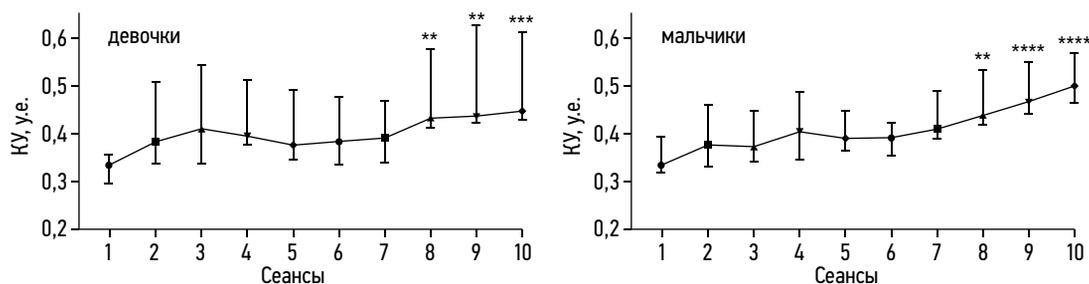
Множественный статистический анализ проводили с использованием метода Краскела–Уоллеса и теста Дана. Парное сравнение зависимых параметрических массивов осуществляли с применением Т-критерия Стьюдента для зависимых выборок. В случае парного сравнения зависимых непараметрических массивов применяли критерий Уилкоксона, для независимых непараметрических — критерий Манна–Уитни. Различия считали значимыми при  $p < 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Анализ коэффициента успешности девочек и мальчиков по результату 10 сеансов тренингов на базе неинвазивного интерфейса «мозг — компьютер — экзоскелет кисти»

Массивы данных по КУ не соответствовали параметрическому распределению, поэтому для их статистического анализа применяли метод Краскела–Уоллеса и тест Дана. Результативность взаимодействия с нейроинтерфейсом оценивали по изменению КУ испытуемых в течение 10 сеансов нейротренинга, для чего строился индивидуальный график динамики КУ. В результате такого графического анализа участников исследования разделили на две группы: в 1-й — наблюдалось постепенное, более или менее устойчивое линейное увеличение КУ в ходе сеансов нейротренинга — «успешные» испытуемые; во 2-й — значение КУ колебалось вблизи фонового уровня (сеанс 1) — «неуспешные» испытуемые. Далее мы подробно опишем выявленную динамику КУ, в т. ч. с представлением его конкретных числовых значений.

В связи с отмеченной разницей в динамике КУ испытуемых-девочек мы разделили на «успешных» 12 девочек (средний возраст —  $11,16 \pm 0,97$  года) и «неуспешных» 6 ( $11,00 \pm 0,89$  года) участниц исследования. Уровень значимости отличий по возрасту между этими подгруппами испытуемых составил  $p=0,801$ . Далее на рис. 1 (девочки) представлена динамика КУ 12 девочек («успешные»), из которой видно, что с 8-го сеанса КУ достигает значимо более высокого уровня по сравнению с его значением на 1-м сеансе. Так, на 1-м сеансе КУ «успешных» девочек составлял  $0,33 (0,29; 0,36)$ . На 8-м КУ повышался до  $0,43 (0,41; 0,59; p=0,0032)$ , а на последнем, 10-м сеансе, достигал  $0,44 (0,43; 0,61) p=0,0007$  по сравнению с показателем 1-го сеанса. У шести «неуспешных» девочек КУ на 1-м сеансе составлял  $0,43 (0,41; 0,50)$  и на последнем, 10-м сеансе, равнялся  $0,41 (0,34; 0,47; p=0,999)$  по сравнению с 1-м сеансом.



**Рис. 1.** Динамика коэффициента успешности 12 «успешных» девочек и 19 «успешных» мальчиков в течение 10 сеансов нейротренингов. КУ — коэффициент успешности, представлен в условных единицах (у. е.); данные приведены по медиане и квартилям (Q1; Q3); \*\* — отличия от показателей 1-го дня при  $p < 0,01$ ; \*\*\* — отличия от показателей 1-го дня при  $p < 0,001$ ; \*\*\*\* — отличия от показателей 1-го дня при  $p < 0,0001$ .

**Fig. 1.** Changes in success coefficient in 12 “successful” girls and 19 “successful” boys during 10 neurotraining sessions. SC, success coefficient, standard units; data are shown as medians with interquartile ranges (Q1; Q3). \*\*, differences from day 1,  $p < 0.01$ ; \*\*\*, differences from day 1,  $p < 0.001$ ; \*\*\*\*, differences from day 1,  $p < 0.0001$ .

Испытуемых мальчиков также разделили на «успешных» ( $n=19$ ;  $9,68 \pm 0,74$  года) и «неуспешных» ( $n=11$ ;  $9,09 \pm 0,82$  года) с уровнем значимости отличий по возрасту  $p=0,708$ . Динамика КУ «успешных» мальчиков в течение 10 сеансов нейротренинга представлена на рис. 1 (мальчики). Так, КУ значительно возрастал к 8-му сеансу терапии с линейным увеличением числового значения в последующие два сеанса. На 1-м сеансе КУ «успешных» мальчиков составлял 0,33 (0,31; 0,39), а на 8-м КУ повышался до 0,44 (0,42; 0,53;  $p=0,0014$ ), и на последнем, 10-м сеансе, равнялся 0,50 (0,46; 0,57;  $p=0,0000017$ ) по сравнению с 1-м сеансом.

У 11 «неуспешных» мальчиков КУ на 1-м сеансе составлял 0,44 (0,33; 0,53) и на последнем, 10-м сеансе, достигал 0,47 (0,41; 0,54;  $p=0,999$ ).

Следовательно, у 12 испытуемых-девочек и 19 испытуемых-мальчиков 10 сеансов реабилитационных мероприятий с использованием НИМК привели к улучшению показателя взаимодействия с нейроинтерфейсом.

### Изменение уровня речевых навыков девочек и мальчиков после 10 сеансов тренингов на базе неинвазивного интерфейса «мозг — компьютер»

При анализе уровня речевых навыков испытуемых, основываясь на результаты изменения КУ, мы провели дифференциацию на «успешных» и «неуспешных». Среди 12 «успешных» девочек 9 испытуемых продемонстрировали прирост показателей во всех трёх методиках — по оральному праксису и артикуляции, звукопроизношению и методике «предложения по картинкам» (рис. 2, девочки).

Оставшиеся три девочки продемонстрировали прирост речевых навыков по двум из трёх использованных методик. В подгруппе «неуспешные» только одна девочка продемонстрировала прирост речевых навыков по трём методикам, две девочки — по двум методикам, две — по одной методике и у одной испытуемой уровень речевых навыков не изменился.

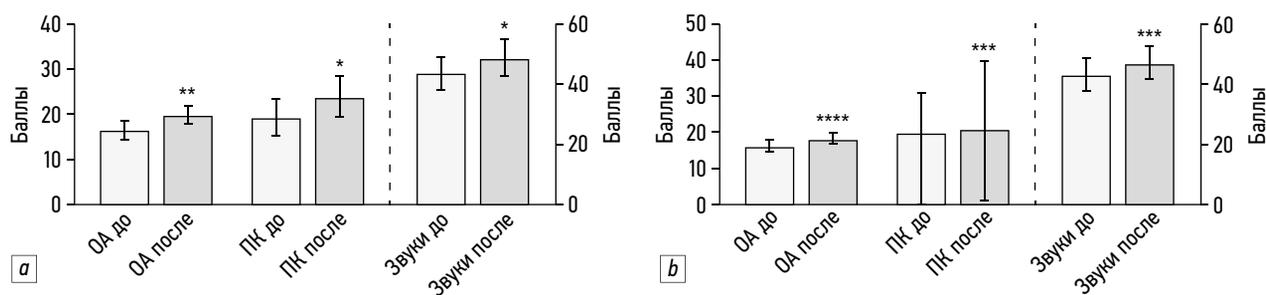


**Рис. 2.** Дифференциация испытуемых по результативности в различных методиках оценки речевых навыков после 10 сеансов нейротренингов. «Успешные» — испытуемые, которые демонстрировали увеличение значения коэффициента успешности; «неуспешные» — испытуемые, у которых коэффициент успешности оставался на фоновом уровне. Внутри круговых диаграмм указана численность испытуемых.

**Fig. 2.** Differentiation of participants by performance in various speech assessment methods after 10 neurotraining sessions. “Successful” indicates participants who demonstrated an increasing success coefficient; “unsuccessful” indicates those whose success coefficient remained at baseline. Participant counts are indicated on the pie charts.

В подгруппе «успешных» испытуемых мальчиков у 12 человек после 10 сеансов нейротренингов наблюдали прирост речевых навыков по всем трём методикам. Пять мальчиков из подгруппы «успешные» набирали большее количество баллов после 10 сеансов нейротренинга по двум из использованных методик и двое испытуемых — только по одной методике (рис. 2, мальчики). В подгруппе «неуспешных» мальчиков прирост речевых навыков по всем трём методикам наблюдали только у двух испытуемых, по двум методикам — у пяти, по одной методике — ещё у двух. Двое испытуемых после 10 сеансов нейротренинга продемонстрировали исходный уровень речевых навыков.

Далее мы провели сравнение набранных баллов по методикам оценки речевых навыков «успешными» испытуемыми до и после 10 сеансов нейрореабилитации.



**Рис. 3.** Уровень речевых навыков 12 «успешных» девочек (а) и 19 «успешных» мальчиков (б) «до» нейротренинга и «после» 10 сеансов. OA — оральный праксис и артикуляция; ПК — предложения по картинкам; звуки — звукопроизношение; представлены среднее значение и ошибка среднего; \* — отличия показателей «до» и «после» 10 сеансов нейротренингов при  $p < 0,05$ ; \*\* — отличия показателей «до» и «после» 10 сеансов нейротренингов при  $p < 0,01$ ; \*\*\* — отличия показателей «до» и «после» при  $p < 0,001$ ; \*\*\*\* — отличия показателей «до» и «после» при  $p < 0,0001$ ; для мальчиков в случае ПК представлены медиана и квартили Q1 и Q3; во всех остальных случаях представлены средние значения и стандартная ошибка.

**Fig. 3.** Speech skill levels in 12 “successful” girls (a) and 19 “successful” boys (b) before and after 10 neurotraining sessions. OA, oral praxis and articulation; PC, picture-based sentence formation; sounds, speech sound articulation. Data are presented as mean and standard error; \*, differences between values obtained before and after 10 neurotraining sessions,  $p < 0.05$ ; \*\*, differences between values obtained before and after 10 neurotraining sessions,  $p < 0.01$ ; \*\*\*, differences between values obtained before and after 10 neurotraining sessions,  $p < 0.001$ ; \*\*\*\*, differences between values obtained before and after 10 neurotraining sessions,  $p < 0.0001$ ; data are presented as mean and standard error, except for PC scores in boys, which are presented as median and interquartile range (Q1; Q3).

Для этого применяли Т-критерий Стьюдента для зависимых выборок и в случае непараметрического распределения — Т-критерий Уилкоксона. У 12 «успешных» девочек все изменения находились на значимом уровне отличий: по методике «оральный праксис и артикуляция» до сеансов нейротренинга «успешные» девочки в среднем набирали  $16,58 \pm 2,16$  балла, после 10 сеансов —  $19,92 \pm 2,22$  балла ( $p = 0,0037$ ); «предложения по картинкам» — до  $19,33 \pm 4,24$  балла, после —  $23,92 \pm 4,77$  балла ( $p = 0,026$ ); звукопроизношение — до  $43,67 \pm 5,53$  балла, после —  $48,75 \pm 6,39$  балла ( $p = 0,040$ ) (рис. 3, а).

Анализ набранных баллов «успешными» мальчиками продемонстрировал, что по методике «оральный праксис и артикуляция» до сеансов нейротренинга они в среднем набирали  $16,42 \pm 1,70$  балла, после 10 сеансов —  $18,42 \pm 1,70$  балла ( $p = 0,0000030$ ). По методике «предложения по картинкам» медиана до сеансов составляла 20,00 балла, квартиль 1 — 0,00, квартиль 2 — 31,00, после сеансов — 21,00 (1,00; 40,00) балла ( $p = 0,0001$ ). По методике «звукопроизношение» до сеансов было  $43,32 \pm 5,65$  балла, после —  $47,11 \pm 5,71$  балла ( $p = 0,0008$ ) (см. рис. 3, б).

Далее мы провели аналогичный статистический анализ в группах «неуспешных» девочек и мальчиков. При сравнении количества баллов, которые набрали «неуспешные» девочки до сеансов нейрореабилитации и после них значимых отличий выявить не удалось. В случае «неуспешных» мальчиков по методике «оральный праксис и артикуляция» до сеансов нейротренинга количество набранных баллов составляло  $15,73 \pm 3,33$  балла, после 10 сеансов —  $17,55 \pm 3,42$  балла ( $p = 0,0069$ ); «предложения по картинкам» — количество баллов «до» и «после» не отличалось; звукопроизношение — «до» — 60 (0; 74) баллов, «после» — 62 (2; 74) балла ( $p = 0,031$ ).

На следующем этапе анализа мы сравнивали уровень изменения набранных баллов по методикам оценки речевых навыков «успешными» и «неуспешными» испытуемыми после 10 сеансов нейротренинга. Важно отметить, что в случае исследования индивидуальной зависимости (парные параметры «до» и «после» по каждому испытуемому) при проведении сравнения показателей независимых групп для оценки выраженности изменений необходимо сравнивать не нативные данные, а именно количественную составляющую отличий. Для этого мы вычислили разницу (дельта) между баллами «до» и «после» отдельно в группе «успешные» и «неуспешные». По результату статистического анализа заметные отличия выявлены только у мальчиков: по методике «предложения по картинкам» «успешные» испытуемые набирали 2 (0; 4) балла, а «неуспешные» — 0 (0; 1) баллов ( $p = 0,014$ ); по методике «звукопроизношение» «успешные» — 2 (1; 4), «неуспешные» — 2 (0; 2), но отличия находились на уровне тенденции ( $p = 0,060$ ).

Следовательно, «успешные» мальчики продемонстрировали прирост баллов по трём методикам оценки речевых навыков с более выраженным улучшением по сравнению с «неуспешными» мальчиками.

Отсутствие значимых отличий между группами «успешных» и «неуспешных» девочек, вероятнее всего, связано с малой численностью ( $n = 6$ ) «неуспешных» девочек.

### Изменение уровня речевых навыков девочек и мальчиков контрольной группы

Перед обработкой результатов, полученных в контрольной группе испытуемых, мы предположили, что если сеансы нейрореабилитации способствуют улучшению речевых навыков, то в контрольной группе их изменение должно иметь значимо меньшую выраженность. Действительно,

**Таблица 1.** Сравнение выраженности (дельта) изменений набранных баллов «до» и «после» реабилитационных мероприятий в контрольной и в экспериментальной группах испытуемых**Table 1.** Comparison of changes (delta) in speech assessment scores before and after rehabilitation between control and experimental groups

Методики оценки речевых навыков	Девочки		Мальчики	
	Контроль (n=12)	Успешные (n=12)	Контроль (n=18)	Успешные (n=19)
Оральный праксис и артикуляция	0,0 (0,0; 0,0)	2,5 (2,0; 3,0) $p=0,000081$	0,0 (0,0; 0,0)	2,0 (1,0; 3,0) $p=0,00000032$
Предложения по картинкам	0,0 (0,0; 0,0)	2,0 (1,0; 6,75) $p=0,0053$	0,0 (0,0; 0,0)	2,0 (0,0; 4,0) $p=0,00016$
Звукопроизношение	0,0 (0,0; 0,75)	1,0 (1,0; 7,5) $p=0,00035$	0,0 (0,0; 0,25)	2,0 (1,0; 4,0) $p=0,00028$

Примечание. Представлены медианы и квартили Q1 и Q3; контроль — дельта в контрольной группе; успешные — дельта в группе испытуемых, которые проходили сеансы нейрореабилитации и демонстрировали увеличение коэффициента эффективности.



**Рис. 4.** Доля испытуемых по направленности изменения набранных баллов в методиках оценки речевых навыков в контрольной группе. Внутри круговых диаграмм указана численность испытуемых.

**Fig. 4.** Distribution of participants in the control group by trends in speech assessment score variations. Participant counts are indicated on the pie charts.

большая часть контрольных испытуемых после завершения цикла реабилитации (8 девочек и 12 мальчиков контрольной группы) набирала количество баллов, равное исходному уровню; три девочки и четверо мальчиков набирали большее количество баллов по одной методике, и одна девочка и два мальчика демонстрировали прирост баллов по двум методикам (рис. 4).

После количественного анализа мы провели статистическое сравнение набранных баллов испытуемыми контрольной группы «до» и «после» цикла двигательной реабилитации и, что предсказуемо, не обнаружили статистически значимых отличий.

### Сравнение уровня речевых навыков девочек и мальчиков контрольной и экспериментальной групп

В рамках выявленных в настоящем исследовании зависимостей мы провели сравнение количества набранных баллов «успешными» девочками и мальчиками с участницами и участниками контрольной группы. В этом случае мы также проводили статистический анализ по выраженности изменений для чего вычислили разницу (дельта) между баллами «до» и «после» реабилитационных мероприятий в контрольной группе и в экспериментальной группе испытуемых. Далее статистическому анализу подвергли именно

массивы с рассчитанной разницей. Ожидаемо была получена значимая разница по всем трём методикам оценки речевых навыков, т. к. в контроле дельта находится вблизи нуля, а после сеансов нейрореабилитации прирост набранных баллов значительно более выражен (табл. 1).

Проведённое сравнение убедительно демонстрирует, что даже при отсутствии специальной логопедической работы «успешные» испытуемые по результатам 10 сеансов нейрореабилитации демонстрируют улучшение речевых навыков по сравнению со своим фоновым (до сеансов нейрореабилитации) уровнем и по отношению к контрольной группе испытуемых.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования убедительно демонстрируют, что пациенты с ДЦП, у которых наблюдалось повышение КУ в процессе сеансов нейрореабилитации, показали более выраженное улучшение речевых навыков по сравнению с испытуемыми, у которых КУ не изменялся, и с испытуемыми контрольной группы. Полученные результаты совпадают с данными других авторов о наличии сенсомоторной интеграции и функциональной взаимосвязи двигательных и речевых отделов центральной нервной системы [7]. Отметим, что ранее нами была показана эффективность методики НИМК у пациентов детского возраста с диагнозом ДЦП [16, 17]. После проведения нейротренингов по разработанной методике [18] наблюдалось выраженное улучшение двигательной функции кисти, повышение возможности самообслуживания и бытовых навыков. Параллельно отмечалось значительное улучшение эмоционального состояния детей и членов их семьи, когнитивных функций, прежде всего, внимания. В текущем исследовании мы получили экспериментальное подтверждение, что применение методики НИМК, кроме улучшения двигательных навыков у пациентов, вызывает достоверное улучшение речевых функций. При этом нейрофизиологические и нейровизуализационные показатели детей с ДЦП не связаны с патогенезом гемипареза [19]. При восстановительном лечении пациентов важное

значение имеют такие факторы, как мотивация испытуемых и их родителей, психоэмоциональное состояние детей/родителей и взаимоотношения в семье, наличие сопутствующей соматической патологии и т. д. [20, 21].

Когнитивная, психологическая зрелость девочек и мальчиков отличается в детском и подростковом возрасте, а также в источниках литературы отмечаются гендерные отличия по когнитивным и коммуникативным показателям пациентов с ДЦП [22]. Указанные различия могли сказаться на результатах исследования, именно поэтому мы разделяли испытуемых по половому признаку. Отметим, что мы проводили сравнение значений регистрируемых показателей КУ и речевых навыков между девочками и мальчиками «внутри» экспериментальной группы и речевых навыков между девочками и мальчиками контрольной группы. Во всех случаях сравнения уровень значимости отличий был более 0,05, что указывает на отсутствие гендерных различий; поэтому в тексте статьи мы подробно не описывали эти результаты. Можно предположить, что в условиях эксперимента в основном задействованы наиболее общие механизмы, без выраженного вовлечения специфических функциональных элементов, которые связаны с полом.

В группе с проводимым нейротренингом, согласно нашей рабочей гипотезе, мы дифференцировали испытуемых по уровню КУ на «успешных» и «неуспешных», и наша гипотеза о прямой зависимости между КУ по взаимодействию с нейроинтерфейсом и улучшением речевых навыков полностью оправдалась. Считаем, что в основе улучшения речевых навыков пациентов с ДЦП при прохождении сеансов нейротренинга лежит анатомическая близость корковых моторных и речевых центров [7–9], и их функциональное пересечение характерно не только при формировании патологических изменений, но и в восстановительных процессах. Кроме того, в результате активации сенсомоторных центров возникают функциональные условия для стимулирования речевых центров. Так, центр Брока в доминантном полушарии расположен в нижней части премоторной коры в непосредственной близости с нижними отделами передней центральной извилины, отвечающими за моторику губ и языка, и средней частью прецентральной извилины, обеспечивающей движения кисти. Необходимо подчеркнуть, что и другие структуры центральной нервной системы (ствола головного мозга, мозжечка, проводящих путей) также участвуют в организации как двигательных, так и речевых процессов, что определяет сочетание нарушений двигательной и речевой функций при их повреждении [2], а также является базисом для совместного вовлечения в процессы реабилитации.

Полученные результаты исследования не отменяют и не противоречат логопедической работе. Мы полагаем, что при совмещении логопедической работы и сеансов нейротренинга удастся добиться более значимых результатов по улучшению речевых навыков пациентов с ДЦП.

Такие методические рекомендации, по нашему мнению, наиболее актуальны для пациентов, которые продемонстрируют значимое увеличение КУ, что можно выявить только в процессе сеансов нейротренинга. Не исключено, что и для «неуспешных» по КУ испытуемых логопедическая коррекция на фоне сеансов нейротренинга будет более результативной по сравнению с отдельным воздействием только логопедических методик. Высказанные предположения требуют дальнейшей экспериментальной проверки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сеансы нейротренинга с использованием НИМК достоверно улучшают речевые навыки испытуемых, которые успешно взаимодействуют с нейроинтерфейсом и демонстрируют прирост КУ.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Х.Д.Р. — анализ, визуализация, методология, создание черновика, редактирование рукописи; К.Л.Л. — концептуализация, методология, редактирование рукописи; В.С.В. — ресурсы, общее руководство; Б.Е.А. — редактирование рукописи; О.Л.С. — исследование. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Этическая экспертиза.** Исследование одобрено локальным этическим комитетом Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (протокол № 1 от 25 января 2022 г.). Получено информированное согласие от родителей на участие детей в исследовании.

**Согласие на публикацию.** Авторы получили письменное согласие от родителей пациентов на использование результатов и их публикацию. Все представленные сведения обезличены, фотографии не публикуются.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при поддержке гранта РФ и Республики Крым № 22-15-20035, <https://rscf.ru/en/project/22-15-20035/>.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

**Доступ к данным.** Все данные, полученные в настоящем исследовании, доступны в статье и в дополнительных материалах, которые загружены на сайт журнала.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** K.D.R.: formal analysis, visualization, methodology, writing—original draft, writing—review & editing; K.L.L.: conceptualization, methodology, writing—review & editing; V.S.V.: resources, supervision; B.E.A.: writing—review & editing; O.L.S.: investigation. All authors approved

the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Ethics approval:** The study was approved by the Local Ethics Committee of the Vernadsky Crimean Federal University (Protocol No. 1, January 25, 2022). Informed consent was obtained from the parents for their children's participation in the study.

**Informed consent:** Written informed consent was obtained from the parents of the patients for the use and publication of the results. All data presented are anonymized, and no photographs are published.

**Funding sources:** This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Republic of Crimea (No. 22-15-20035), <https://rscf.ru/en/project/22-15-20035/>.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

**Data availability statement:** All data generated or analyzed during this study are included in the article and in the supplementary materials uploaded to the journal's website.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this paper.

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- Kudarinova AS, Sadvakasova NA, Ashimhanova GS, et al. Features of speech development in children with cerebral palsy. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2015;2-1:46-49. EDN: TFOBKP
- Nemkova SA. Speech disorders in children with cerebral palsy: diagnostics and correction. *Journal of Neurology and Psychiatry*. 2019;119(5):112-119. doi: 10.17116/jnevro2019119051112 EDN: GWMXSW
- Adloyan LA. Speech characteristics of children with cerebral palsy. *Universum: Psychology and Education*. 2024;1(115):16-18. doi: 10.32743/UniPsy.2024.115.1.16599 EDN: NRJQWQ
- Upadhyay J, Tiwari N, Ansari MN. Cerebral palsy: aetiology, pathophysiology and therapeutic interventions. *Clin Exp Pharmacol Physiol*. 2020;47(12):1891-1901. doi: 10.1111/1440-1681.13379 EDN: FHALVI
- Paul S, Nahar A, Bhagawati M, Kunwar AJ. A review on recent advances of cerebral palsy. *Oxid Med Cell Longev*. 2022;30:2622310. doi: 10.1155/2022/2622310 EDN: WLIWVY
- Kristoffersson E, Dahlgren Sandberg A, Holck P. Communication ability and communication methods in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2020;62(8):933-938. doi: 10.1111/dmnc.14546 EDN: IXDNCK
- Schomers MR, Pulvermüller F. Is the sensorimotor cortex relevant for speech perception and understanding? An integrative review. *Front Hum Neurosci*. 2016;21(10):435. doi: 10.3389/fnhum.2016.00435 EDN: XUSFKN
- Mikhailovaa AA, Orekhovaa LS, Dyagilevaa YuO, et al. EEG mu rhythm reactivity in children at an early age with different level of receptive speech development under conditions of action observation and execution. *Journal of Higher Nervous Activity*. 2020;70(3):423-433. doi: 10.31857/S0044467720030077 EDN: YZSVUF
- Larina NV, Nacharova MA, Korsunskaya LL, et al. Changes in EEG patterns in the  $\alpha$ -frequency band following BCI-based therapy in children with cerebral palsy. *Bulletin of RSMU*. 2020;(4):41-46. doi: 10.24075/vrgmu.2020.043 EDN: OHCVPM
- Pavlenko VB, Vlasenko SV, Orekhova LS, Biryukova EA. Speech improvement in children with cerebral palsy by "brain-computer-handexo-skeleton" neurointerface rehabilitation. *Bulletin of RSMU*. 2023;4:66-72. doi: 10.24075/vrgmu.2023.026 EDN: OXSQPJ
- Vaillant E, Oostrom KJ, Beckerman H, et al. Developmental trajectories of spoken language comprehension and functional communication in children with cerebral palsy: a prospective cohort study. *Dev Med Child Neurol*. 2024;66(1):95-105. doi: 10.1111/dmnc.15673 EDN: EHREQK
- Pavlenko VB, Vlasenko SV, Chuyan EN, et al. EEG sensorimotor rhythms dynamics in children with cerebral palsy during the course of neurorehabilitation, depending in the success of their imagination of movements. *Russian Journal of Physiology*. 2024;110(8):1223-1237. doi: 10.31857/S0869813924080017 EDN: BDDGPY
- Fotekova TA, Ahutina TV. *Diagnostics of speech disorders of school-children using neuropsychological methods: Manual for speech therapists and psychologists*. Moscow: ARCTI; 2002. (In Russ.) ISBN: 5-89415-259-3 EDN: QRVENB
- Fedotova IR, Bobrov PD. Foundation and aspects of using motor imagery and brain computer interfaces in rehabilitation of children with cerebral palsy. *Zhurnal Vysshei Nervnoi Deyatelnosti Imeni I.P. Pavlova*. 2022;72(1):87-99. doi: 10.31857/S004446772201004X EDN: WMPLQU
- Congedo M, Barachant A, Bhatia R. Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces; a primer and a review. *Brain-Comput Interface*. 2017;4(3):155-174. doi: 10.1080/2326263X.2017.1297192 EDN: ZFKWKZ
- Larina NV, Pavlenko VB, Korsunskaya LL, et al. Rehabilitation possibilities for children with cerebral palsy through the use of robotic devices and biofeedback. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2020;19(3):156-165. doi: 10.20538/1682-0363-2020-3-156-165 EDN: WKIRUQ
- Larina NV, Gordienko AI, Korsunskaya LL, Khimich NV. The role of neurotrophic factors in the rehabilitation of children with cerebral palsy. *Neurology, neuropsychiatry, psychosomatics*. 2022;14(6):12-19. doi: 10.14412/2074-2711-2022-6-12-19 EDN: JZZCZY
- Patent RUS № 2741221 C1/22.01.2021 Byul. №3 Larina NV, Korsunskaya LL, Vlasenko SV, et al. Method for complex rehabilitation of upper extremity motor function in patients with infantile cerebral paralysis. Available from: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2741221C1\\_20210122?ysclid=m3fsuuzu1x177208306](https://yandex.ru/patents/doc/RU2741221C1_20210122?ysclid=m3fsuuzu1x177208306) (In Russ.) EDN: JIEMDK
- Asilova NG, Ganieva MT, Zaripov NA. Neurophysiological and neuroradiological characteristics of children with hemiplegic cerebral palsy with regard to gender and laterality of hemiparesis. *Avicenna Bulletin*. 2023;25(2):170-181. doi: 10.25005/2074-0581-2023-25-2-170-181 EDN: PHXPCC
- Novikova LB, Akopyan AP, Sharapova KM. Factors affecting the effectiveness of rehabilitation in patients in the acute period of cerebral stroke. *Problems of Balneology, Physiotherapy, and Exercise Therapy*. 2020;97(2):5-11. doi: 10.17116/kurort2020970215 EDN: UJAAVH
- Kovalchuk VV, Drozdova MS, Nesterin KV. Success factors and reasons for failures in rehabilitation of stroke patients. new possibilities of neuroprotective therapy. *Effective pharmacotherapy*. 2022;18(43):28-36. doi: 10.33978/2307-3586-2022-18-43-28-36 EDN: OXBZGC
- Romeo DM, Venezia I, Pede E, Brogna C. Cerebral palsy and sex differences in children: A narrative review of the literature. *J Neurosci Res*. 2023;101(5):783-795. doi: 10.1002/jnr.25020 EDN: ZGHVVR

## ОБ АВТОРАХ

\* **Хусаинов Денис Рашидович**, канд. биол. наук, доцент, каф. физиологии человека и биофизики; адрес: Россия, 295007, Симферополь, пр-кт академика Вернадского, д. 4; ORCID: 0000-0003-0974-6792; eLibrary SPIN: 4922-3478; e-mail: gangliu@yandex.ru

**Корсунская Лариса Леонидовна**, д-р мед. наук, профессор, заведующий, каф. нервных болезней и нейрохирургии; ORCID: 0000-0003-0958-130X; eLibrary SPIN: 2000-6251; e-mail: neurocrimea@mail.ru

**Власенко Сергей Валерьевич**, д-р мед. наук, профессор, каф. медицинской реабилитации, спортивной медицины и АФК; ORCID: 0000-0002-1417-1164; eLibrary SPIN: 3429-9712; e-mail: vlasenko65@rambler.ru

**Бирюкова Елена Александровна**, канд. биол. наук, доцент, каф. физиологии человека и биофизики; ORCID: 0000-0002-2628-0923; eLibrary SPIN: 8625-5389; e-mail: biotema@mail.ru

**Орехова Лилия Сергеевна**, медицинский психолог, ведущий научный сотрудник, научно-клинический центр «Технологии здоровья и реабилитации»; ORCID: 0000-0003-0353-641X; eLibrary SPIN: 5885-4536; e-mail: lili\_psy@mail.ru

## AUTHORS' INFO

\* **Denis R. Khusainov**, Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor, Depart. of Human Physiology and Biophysics; address: 4 Akademika Vernadskogo ave, Russia, Simferopol, 295007; ORCID: 0000-0003-0974-6792; eLibrary SPIN: 4922-3478; e-mail: gangliu@yandex.ru

**Larisa L. Korsunskaya**, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Head, Depart. of Nervous Diseases and Neurosurgery; ORCID: 0000-0003-0958-130X; eLibrary SPIN: 2000-6251; e-mail: neurocrimea@mail.ru

**Sergey V. Vlasenko**, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Depart. of Medical Rehabilitation, Sports Medicine and Adaptive Physical Education; ORCID: 0000-0002-1417-1164; eLibrary SPIN: 3429-9712; e-mail: vlasenko65@rambler.ru

**Elena A. Biryukova**, Cand. Sci. (Biology), Assistant Professor, Depart. of Human Physiology and Biophysics; ORCID: 0000-0002-2628-0923; eLibrary SPIN: 8625-5389; e-mail: biotema@mail.ru

**Liliia S. Orekhova**, Medical psychologist, leading researcher, Scientific and Clinical Center "Health and Rehabilitation Technologies"; ORCID: 0000-0003-0353-641X; eLibrary SPIN: 5885-4536; e-mail: lili\_psy@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author