

EDN: WJGIOW

УДК 616.831-073.75:615.825-053.2

DOI: 10.56618/2071-2693_2025_17_3_111



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ РЕОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧИХ СЕТЕЙ ПОКОЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА НА ОСНОВЕ ВЫБОРА ИНТЕРЕСА (ПЕРВИЧНАЯ МОТОРНАЯ КОРА И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ МОТОРНАЯ ОБЛАСТЬ) У ПАЦИЕНТОВ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИОННОГО КОСТЮМА

Фатима Альбековна Тлизамова¹

✉fatima.albekovna@mail.ru, orcid.org/0009-0009-2358-7880

Александр Юрьевич Ефимцев¹

atralf@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2249-1405

Геннадий Евгеньевич Труфанов¹

trufanovge@mail.ru, orcid.org/0000-0002-1611-5000

Наталья Евгеньевна Иванова¹

ivamel@yandex.ru, orcid.org/0000-0003-2790-0191, SPIN-код: 1854-7827

Дария Дмитриевна Дорохова¹

dariadorokhowa@yandex.ru, orcid.org/0009-0007-3646-4439

Анатолий Геннадьевич Левчук¹

levchuk_ag@mail.almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0002-8848-3136, SPIN-код: 6214-5934

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197341)

Резюме

ВВЕДЕНИЕ. Детский церебральный паралич (ДЦП) является ведущей причиной двигательных нарушений у детей и требует комплексных реабилитационных подходов, эффективность которых нуждается в объективной оценке. Анализ сетей покоя головного мозга с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) открывает новые возможности для понимания нейропластических изменений в ответ на терапию.

ЦЕЛЬ. Оценить влияние курса реабилитации с использованием нейрореабилитационного костюма на клинические показатели и функциональную связность сетей покоя у детей со спастическими формами ДЦП.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В проспективном исследовании приняли участие 30 детей (средний возраст – (8 ± 3) года) со спастической диплегией (уровни II–III по GMFCS). Все дети прошли 4-недельный курс реабилитации с применением нейрореабилитационного костюма. До и после курса проводилась клиническая оценка (MAS, SATCo, Ashworth Scale, гониометрия) и rs-fMRI (Siemens 1,5 T). Анализ данных фМРТ включал в себя оценку внутри- и межсетевой связности методом seed-based для ROI сенсомоторной сети (СМС); статистический анализ был выполнен с применением программного обеспечения Matlab и CONN v. 22A, в основе – парный t-тест, корреляция Пирсона.

РЕЗУЛЬТАТЫ. После завершения 4-недельного курса реабилитации у пациентов наблюдались следующие статистически значимые изменения по всем основным клиническим шкалам: улучшение функции кисти по шкалам MAS и контроля туловища по SATCo, увеличение амплитуды движений по данным гониометрии. Данные фМРТ выявили усиление функциональной связности между ключевыми оцениваемыми функциональными зонами головного мозга – сенсомоторной сетью (СМС): первичной моторной корой и дополнительной моторной областью, а также снижение так называемой патологической гиперконнективности между СМС и сетью пассивного режима работы мозга (СПРР). Увеличение связности в СМС значимо коррелировало с улучшением моторных функций ($r=0,65$; $p<0,01$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Применение реабилитационного костюма способствует не только клиническому улучшению, но и положительной реорганизации функциональных сетей головного мозга у детей с ДЦП. Анализ сетей покоя является чувствительным инструментом для объективизации эффектов реабилитации и понимания механизмов нейропластичности.

Ключевые слова: детский церебральный паралич, реабилитационный костюм, функциональная магнитно-резонансная томография, сети покоя, функциональная связность, нейропластичность, сенсомоторная сеть

Для цитирования: Тлизамова Ф. А., Ефимцев А. Ю., Труфанов Г. Е., Иванова Н. Е., Дорохова Д. Д., Левчук А. Г. Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке реорганизации рабочих сетей покоя головного мозга на основе выбора интереса (первичная моторная кора и дополнительная моторная область) у пациентов с детским церебральным параличом после применения нейрореабилитационного костюма // Российский нейрохирургический журнал им. проф. А. Л. Поленова. 2025. Т. XVII, № 3. С. 111–122. DOI: 10.56618/2071-2693_2025_17_3_111.

ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF A REHABILITATION SUIT IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY BASED ON COMPARATIVE CHANGES IN RESTING-STATE FUNCTIONAL BRAIN NETWORKS

Fatima A. Tlizamova¹

✉fatima.albekovna@mail.ru, orcid.org/0009-0009-2358-7880

Alexander Yu. Efimtsev¹

atralf@mail.ru, orcid.org/0000-0003-2249-1405

Gennady E. Trufanov¹

trufanovart@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1611-5000

Natalya E. Ivanova¹

ivanova_n_e@almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0003-2790-0191, SPIN-code: 1854-7827

Daria D. Dorokhova¹

dariadorokhowa@yandex.ru, orcid.org/0009-0007-3646-4439

Anatoly G. Levchuk¹

levchuk_ag@mail.almazovcentre.ru, orcid.org/0000-0002-8848-313, SPIN-code: 6214-5934

¹ Almazov National Medical Research Center (2 Akkuratova street, St. Petersburg, Russian Federation, 197341)

Abstract

INTRODUCTION. Cerebral palsy (CP) is the leading cause of motor impairment in childhood and calls for comprehensive rehabilitation approaches whose effectiveness must be objectively verified. Resting-state functional MRI (rs-fMRI) provides new opportunities to explore neuroplastic changes elicited by therapy.

AIM. To evaluate the impact of a rehabilitation course employing a neuro-orthopedic suit on clinical outcomes and resting-state functional connectivity in children with spastic forms of CP.

MATERIALS AND METHODS. Thirty children with spastic diplegia (Gross Motor Function Classification System, GM-FCS levels II–III; mean age (8±3) years) were enrolled in a prospective study. All participants completed a 4-week rehabilitation program using the “Atlant” suit. Clinical assessments (GMFM-88, Modified Ashworth Scale, MACS, SATCo, goniometry) and rs-fMRI (Siemens 1.5 T) were performed before and after the course. Seed-based analysis focused on the sensorimotor network (SMN); intra- and inter-network connectivity changes were examined. Statistics included paired t tests and Pearson correlation.

RESULTS. After the 4-week intervention, significant improvements were observed on all principal clinical scales: total GMFM-88 scores increased, spasticity on the Modified Ashworth Scale decreased, manual ability (MACS) and trunk control (SATCo) improved, and joint range of motion increased on goniometry (all $p < 0.05$). rs-fMRI revealed strengthened functional connectivity between key SMN nodes (primary motor cortex and supplementary motor area) and a reduction of pathological hyperconnectivity between the SMN and the default mode network (DMN). Enhancement of SMN connectivity correlated with motor gains ($r = 0.65$, $p < 0.01$).

CONCLUSION. Use of the rehabilitation suit leads not only to clinical improvement but also to favorable reorganization of functional brain networks in children with CP. Resting-state network analysis is a sensitive tool for objectifying rehabilitation effects and elucidating mechanisms of neuroplasticity.

Keywords: cerebral palsy, rehabilitation suit, fMRI, resting-state networks, functional connectivity, neuroplasticity, sensorimotor network

For citation: Tlizamova F. A., Efimtsev A. Yu., Trufanov G. E., Ivanova N. E., Dorokhova D. D., Levchuk A. G. Analysis of the effectiveness of a rehabilitation suit in children with cerebral palsy based on comparative changes in resting-state functional brain networks. Russian neurosurgical journal named after professor A. L. Polenov. 2025;XVII(3):111–122. (In Russ.). DOI: 10.56618/2071-2693_2025_17_3_111.

Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) представляет собой гетерогенную группу пер-

манентных, не прогрессирующих нарушений двигательной функции и постурального контроля, приводящих к ограничению активности

и обусловленных повреждением либо аномалией развития незрелого головного мозга в пренатальном, перинатальном или раннем постнатальном периоде [1]. Это наиболее частая причина физической инвалидности в детском возрасте, требующая пожизненной реабилитационной поддержки [2]. В 2023–2024 гг. в России первичная заболеваемость детским церебральным параличом достигла 209,4 случая на 100 000 детей младше 14 лет, тогда как среди подростков 15–18 лет она составила 14,4 случая на 100 000 человек [3]. Современные подходы к реабилитации включают в себя лечебную физкультуру, массаж, физиотерапию и применение разных форм электростимуляции – транскраниальной, черезкожной, транслингвальной и др. [4, 5].

Нейрореабилитационный костюм – это одна из современных разработок в сфере реабилитационных технологий. Существует широкий спектр костюмов. Первые терапевтические модели для коррекции мышечного тонуса были вдохновлены «пингвинским костюмом» советской космической программы 1960-х гг. [6]. Космонавтам он компенсировал отсутствие гравитации за счет эластичных тяг, создающих осевую нагрузку на мышцы и кости. Современные нейрореабилитационные костюмы представляют собой следующий этап развития терапевтических моделей – они дополнены интегрированными гибкими электродами и управляющей электроникой, что значительно расширяет их функциональные возможности [7].

Используемый костюм, создавая корригирующий каркас и обеспечивая афферентное проприоцептивное воздействие на мышцы и суставы, с одновременной коррекцией афферентного вестибуло-проприоцептивного потока на структуры головного мозга, отвечающие за моторный контроль, призван нормализовать мышечный тонус и постуральный контроль [8]. В костюме реализуется принцип реципрокного торможения, таким образом, стимуляция мышц-антагонистов способствует уменьшению спастичности.

Оценка эффективности нейрореабилитации остается сложной задачей, несмотря на широкое применение различных методик, тре-

бует применения высокочувствительных инструментов, таких как анализ функциональных сетей покоя с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), способных выявлять нейропластические изменения [9]. Традиционные клинические шкалы, хотя и являются «золотым стандартом», не всегда могут уловить «тонкие» изменения и не раскрывают нейрофизиологические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых улучшений [10].

В последние годы активно развиваются исследования нейропластичности – способности мозга реорганизовывать свою структуру и функции в ответ на опыт, обучение или повреждение [11]. Одним из наиболее перспективных инструментов для неинвазивного изучения нейропластических процессов является фМРТ в состоянии покоя (resting-state fMRI) [12]. Этот метод позволяет анализировать спонтанные низкочастотные флуктуации BOLD-сигнала и выявлять так называемые рабочие сети покоя (resting-state networks) – группы областей мозга, демонстрирующие синхронную активность [13]. У пациентов с ДЦП часто наблюдаются аномальные паттерны функциональной связности, особенно в сенсомоторной сети, что отражает лежащие в основе двигательных нарушений патологические изменения [14].

Существует значительное число опубликованных научных работ, анализирующих функциональную архитектуру рабочих сетей покоя головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом [15, 16]. В отечественной литературе доступны лишь единичные исследования, в которых возможности функциональной МР-томографии используются для количественной верификации эффективности нейрореабилитационных вмешательств у детей с ДЦП [17]. Сформировавшийся дисбаланс эмпирических данных свидетельствует о необходимости расширения экспериментально-клинической базы, направленной на оптимизацию реабилитационных технологий и развитие стандартизированных инструментов мониторинга терапевтического процесса у данной когорты пациентов.

Мы предполагаем, что интенсивная реабилитация с использованием костюма может при-

водить к измеримой реорганизации сетей покоя, приближая их паттерны к физиологической норме [18]. Эти изменения могут служить объективным биомаркером эффективности терапии.

Цель исследования – оценить эффективность курса нейрореабилитации с использованием специализированного костюма у детей со спастическими формами ДЦП путем сопоставления динамики клинических показателей с изменениями функциональной коннективности сетей покоя головного мозга.

Материалы и методы

В исследование были включены 30 детей в возрасте от 4 до 15 лет (средний возраст – (8 ± 3) года) с диагнозом «Детский церебральный паралич, спастическая диплегия». Уровень моторных нарушений по классификации GMFCS (Gross Motor Function Classification System) соответствовал II ($n=11$) и III ($n=9$) уровням.

Критерии включения: установленный диагноз ДЦП, возраст от 4 до 15 лет, спастическая диплегия, способность сохранять неподвижность во время фМРТ-сканирования.

Критерии исключения: наличие противопоказаний к МРТ (металлические импланты), эпилепсия в стадии декомпенсации, когнитивные нарушения, препятствующие выполнению инструкций, прохождение ботулинотерапии менее чем за 6 месяцев до исследования.

Исследование было одобрено Локальным этическим комитетом Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (выписка № 1610-23, протокол № 10-23 от 02.10.2023).

Диагностический алгоритм для каждого пациента включал в себя развернутый неврологический осмотр, регистрацию электроэнцефалограммы и магнитно-резонансную томографию. МР-исследование выполняли на томографе с напряженностью магнитного поля 1,5 Тл. Протокол содержал стандартные нативные последовательности для оценки структурных изменений головного мозга, а также исследование функциональной МРТ в режиме покоя. Сканирование проводили дважды – до начала курса нейрореабилитации (базовая точка)

и после его завершения (контрольное обследование).

Протокол реабилитации: все участники прошли 4-недельный курс реабилитации, включавший в себя ежедневные (5 дней в неделю) 60-минутные занятия. Каждое занятие состояло из комплекса лечебной гимнастики, выполняемой в нейроортопедическом реабилитационном костюме. Программа упражнений была индивидуализирована, но включала в себя общие элементы, направленные на растяжку, укрепление мышц, тренировку равновесия и ходьбы.

Костюм представляет собой интегрированную систему аппаратно-программного комплекса для нейрореабилитации, включающую в себя носимый компрессионный модуль с сеткой гибких электродов и генератором импульсов, а также управляющий блок с возможностью программирования протоколов и сбора данных через встроенные ЭМГ-датчики и акселерометры. Система должна обеспечивать чрескожную электрическую нейромюостимуляцию, вызывая деполяризацию афферентных волокон и способствуя синаптической пластичности и росту афферентного притока к соматосенсорной коре. В результате должны улучшаться мышечная трофика, тонус и снижаться вегетативные дисфункции. Протокол применения включал в себя курс стимуляции: 40–90 мин, 5 раз в неделю, в течение 4–6 недель, с подбором индивидуальной амплитуды и параллельной кинезиотерапией для усиления нейропластических эффектов (рис. 1).

Для комплексной количественной и качественной верификации двигательных и коммуникативных функций применяли протокол, включавший в себя следующие оценочные инструменты: система классификации мануальных способностей (Manual Ability Classification System, MACS), сегмент-специфический тест постуральной стабильности (Segmental Assessment of Trunk Control, SAT-Co), шкала Ашворта, гониометрия суставов. Процедура оценки проводилась согласно рекомендациям Американской академии ортопедических хирургов.

МРТ-исследование проводилось на томографе с индукцией магнитного поля 1,5 Тес-

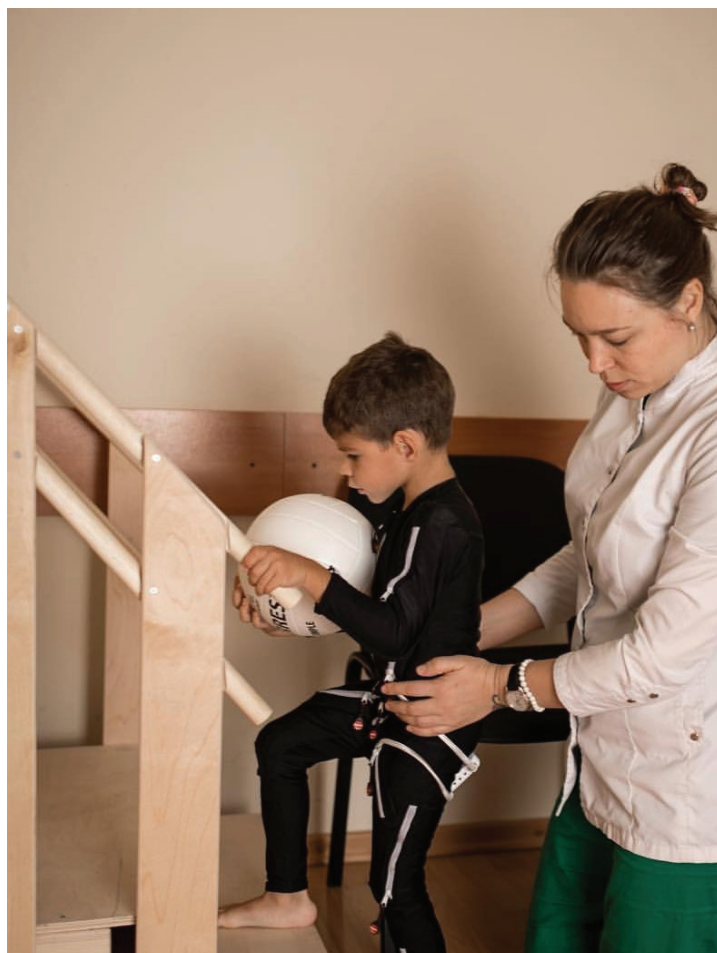


Рис. 1. Костюм Reforma-ТЭКТ
Fig. 1. Reforma-TECT suit



ла. Протокол МРТ головного мозга предусматривал выполнение стандартных импульсных последовательностей с построением изображений в трех взаимно ортогональных проекциях (T1, T2, TIRM, DWI), а также включал в себя resting-state фМРТ (табл. 1).

Во время фМРТп участникам давали инструкцию оставаться бодрствующими, максимально расслабиться и не фиксироваться на определенных мыслях. Процедура проходила без применения анестезии и седативных препаратов.

Предобработку и анализ данных проводили с использованием пакета SPM12 и CONN Toolbox. Предобработка включала в себя коррекцию движения, пространственную нормализацию в стандартное пространство MNI, сглаживание. Для оценки функциональной коннективности был применен метод анализа на основе выбора интереса (seed-based anal-

Таблица 1. Параметры и значения импульсной последовательности при выполнении функциональной МРТ головного мозга

Table 1. Parameters and values of the pulse sequence for resting-state functional MRI of the brain

Параметр импульсной последовательности фМРТ в состоянии покоя (BOLD-)	Значение
Время повторения (TR), мс	3000
Время эхо (TE), мс	30
Угол поворота спинов (FA), °	90
FOV, мм	192
Матрица	64×64
Толщина среза, мм	4,5
Количество срезов	29
Количество повторений	120
Время сканирования, мин	6

ysis). В качестве зоны выбора интереса (region of interest, ROI) были выбраны ключевые области сенсомоторной сети: левая и правая пер-

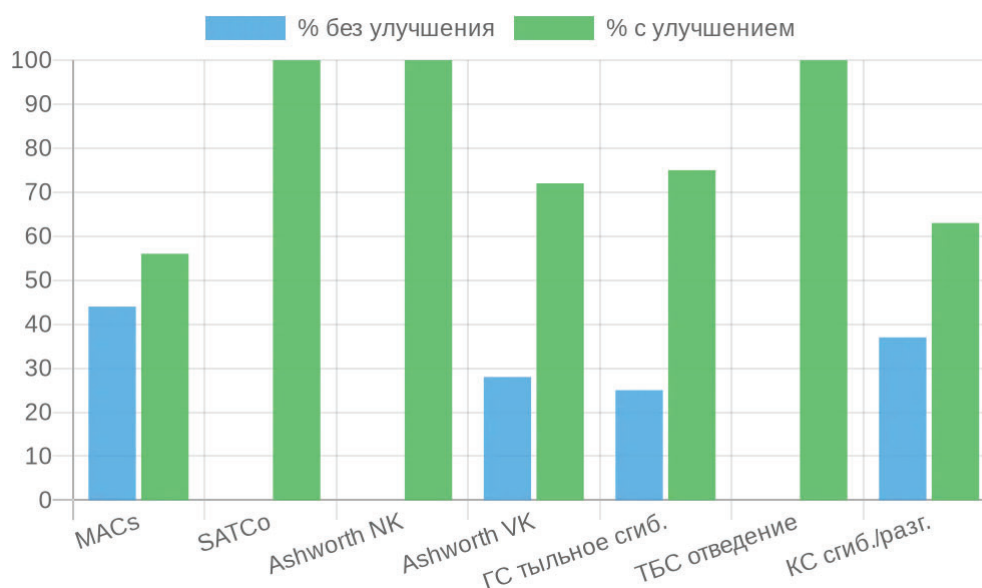


Рис. 2. Иллюстрация динамики изменений до и после реабилитации по данным применяемых неврологических шкал
Fig. 2. Illustration of the dynamics of changes before and after rehabilitation based on the data of applied neurological scales

вичная моторная кора (M1) и дополнительная моторная область (SMA). Рассчитывали карты коннективности для каждой зоны интереса до и после реабилитации.

Результаты исследования

В ходе исследования было установлено улучшение показателей по шкале оценки мануальных способностей у 56 % исследуемых, улучшение показателей по шкале оценки постурального контроля у 100 % исследуемых, улучшение показателей по шкале оценки мышечного тонуса в нижних конечностях у 100 % исследуемых, в верхних конечностях – у 72 % исследуемых, улучшение показателей по гониометрии по показателям тыльного сгибания голеностопного сустава (при согнутом и разогнутом коленном суставе) – у 75 % исследуемых, улучшение показателей по гониометрии по показателям отведения в тазобедренных суставах (при согнутом и разогнутом коленном суставе) – у 100 % исследуемых, улучшение показателей по гониометрии по показателям сгибания/разгибания в коленном суставе – у 63 % исследуемых (рис. 2).

На основе предоставленных результатов фМРТ в покое у детей с ДЦП после реабилитации можно выделить следующие ключе-

вые изменения функциональной коннективности.

Изменения в сети выявления значимости (Salience Network). Выявлено усиление функциональной коннективности передних отделов правой островковой доли с областью префронтальной коры ($T=2,76$; $p=0,0079$), правой скорлупой ($T=2,45$; $p=0,0176$), правой теменной корой ($T=2,41$; $p=0,0190$) и передними отделами верхней височной извилины слева ($T=2,36$; $p=0,0217$). Вместе с тем функциональная связность с левой верхней латеральной затылочной корой была снижена ($T=-2,15$; $p=0,0359$) (рис. 3; 4). Такое перераспределение может отражать улучшение интеграции сенсорной информации, т. е. усиление взаимодействия с подкорковыми структурами, участвующими в процессе моторного контроля.

Изменения в подкорково-мозжечковой коннективности. Выявлено снижение коннективности левого хвостатого ядра с VI и IV-V долями червя мозжечка ($-4,64$ – $(-2,58)$; $p<0,013$) (рис. 5). По данным ряда публикаций, для ДЦП характерна патологическая гиперконнективность базальных ганглиев и мозжечка, поэтому снижение взаимодействия между данными структурами можно рассматривать как нормализацию фоновой активности, что соответ-

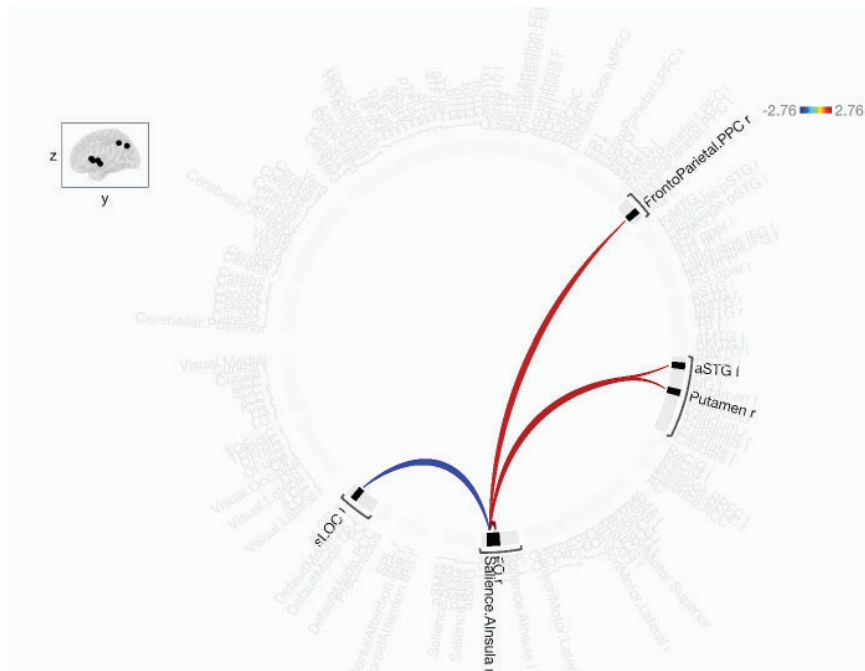


Рис. 3. Коннектограмма изменения функциональной связности между различными структурами головного мозга у пациентов с ДЦП до и после применения нейрореабилитационного костюма. Градация цвета отражает значение p FDR corr (градация «красный – бордовый» отражает усиление/ослабление связности)

Fig. 3. Connectogram showing changes in functional connectivity between various brain structures in patients with cerebral palsy before and after using the neurorehabilitation suit. The color gradient reflects the p -value (FDR corrected), with a red-to-burgundy gradient indicating strengthening/weakening of connectivity

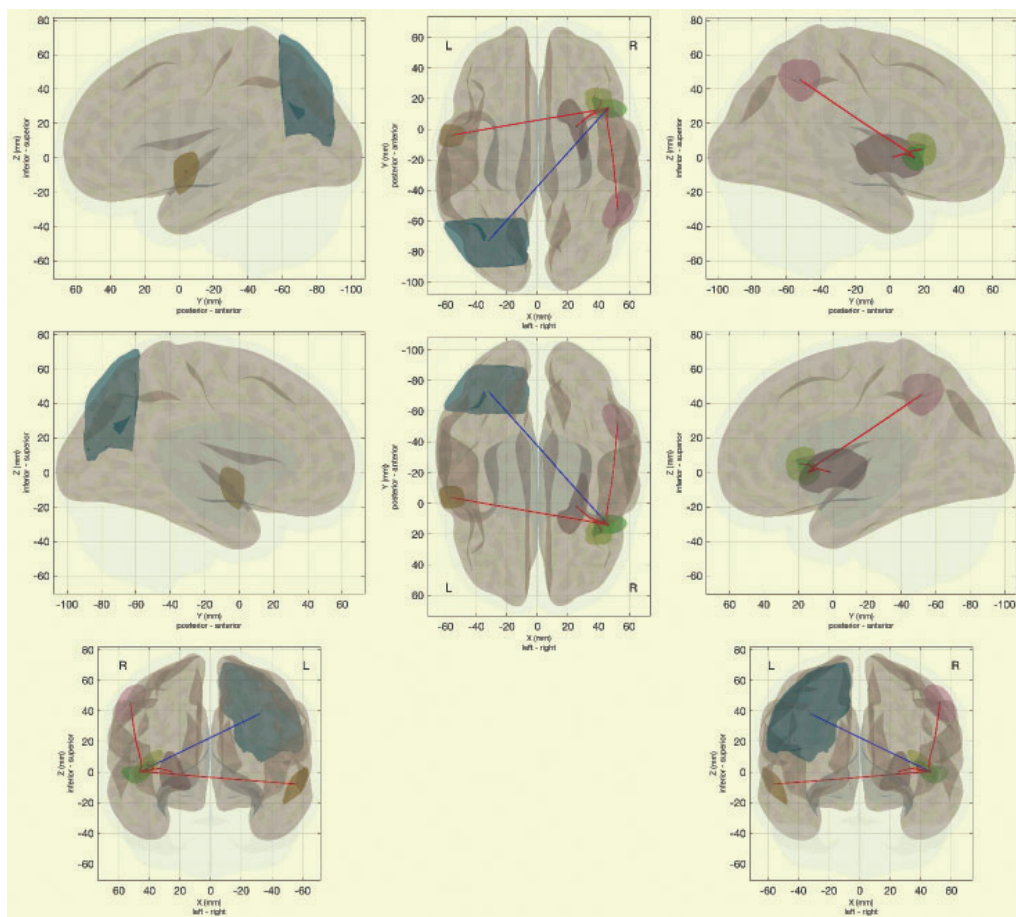


Рис. 4. 3D-реконструкция проекции сверху по результатам анализа всех зон интереса

Fig. 4. 3D reconstruction of the top view based on the analysis of all areas of interest

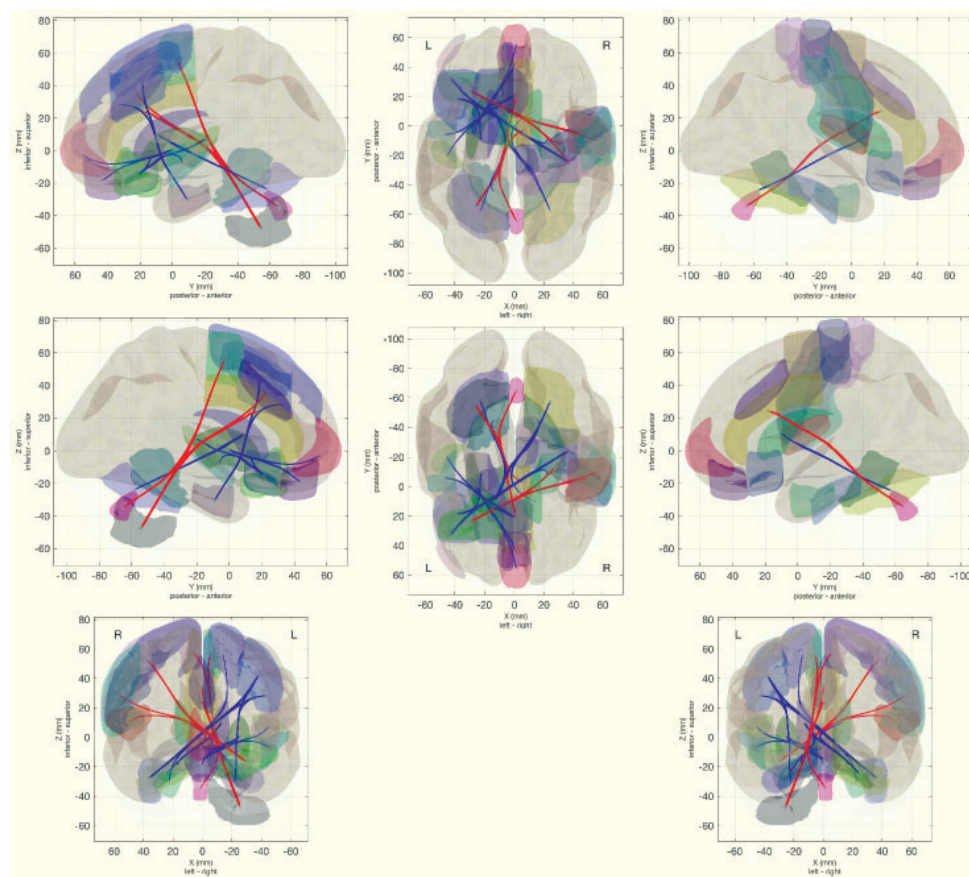


Рис. 6. 3D-реконструкция проекции сверху по результатам анализа всех зон интереса

Fig. 6. 3D reconstruction of the top view based on the analysis of all areas of interest

Ограничения анализа

Коррекция FDR/FWE: большинство результатов не прошло строгую коррекцию на множественные сравнения ($p\text{-FDR} > 0,05$), что требует осторожности в интерпретации.

Размер выборки: умеренный размер группы ($n=57$) ограничивает статистическую мощность.

Механизмы причинности. Дизайн «до – после» не исключает влияния естественного развития/спонтанной реорганизации.

Обсуждение

Рабочая сеть выявления значимости критически важна для обнаружения и фильтрации релевантных стимулов (как внешних, так и внутренних), переключения внимания между сетями (особенно между сетью пассивного режима (РСП) и центральной исполнительной сетью (ЦИС)), инициации когнитивного контроля и интеграции сенсорной информации с вегетативным ответом. Передняя островко-

вая доля (AInsula) является ее ключевым узлом. Усиление ее связей:

- с покрывкой – может отражать улучшение интеграции сенсорных сигналов (включая проприоцепцию) и вегетативного ответа на нагрузку, что актуально при ДЦП и реабилитации;

- со скорлупой (ключевой компонент базальных ганглиев, участвующий в моторном планировании, обучении, когнитивных функциях) – может указывать на улучшение взаимодействия между сетью, детектирующей значимость сигналов (включая проприоцептивные от костюма), и системой, иницирующей и модулирующей двигательные процессы;

- задней теменной корой (ключевой узел фронтопариетальной сети, отвечающей за рабочую память, внимание и пространственную обработку) – усиление связи SN-CEN (через AInsula-PPC), свидетельствует об улучшении способности переключать внимание с внутренних состояний (РСП) на выполнение за-

дач (ЦИС), что критично для эффективного моторного обучения во время реабилитации;

– с передней частью верхней височной извилины (участвует в обработке сложной слуховой информации (включая речь) и социального познания) – усиление связи может быть связано с улучшением интеграции слуховых инструкций/обратной связи во время терапии или общим улучшением когнитивно-коммуникативных аспектов.

Ослабление связи с затылочной корой может отражать перераспределение ресурсов сети от сенсорной обработки в сторону интеграции с моторными и когнитивными системами после интенсивной сенсомоторной реабилитации. Изменения, выявленные во взаимодействии базальных ганглиев и мозжечка: обе структуры критически вовлечены в моторный контроль, координацию, точность движений, моторное обучение и тонус, и при ДЦП наблюдаются нарушения в структуре и функциях обеих систем.

Ослабление функциональной коннективности, имеющее место, может говорить о нормализации работы головного мозга, поскольку исходно у детей с ДЦП могла существовать аномально высокая (компенсаторная или патологическая) связность между различными структурами, отражающая неэффективные попытки контроля движений. Реабилитация, улучшая корковый контроль, могла снизить необходимость в такой подкорковой компенсации. Усиление связей с сенсомоторной корой является значимым результатом в контексте реабилитации детей с ДЦП.

Таким образом, полученные данные демонстрируют нейропластические изменения в функциональной организации мозга детей с ДЦП после курса реабилитации с применением костюма. Изменения затрагивают ключевые сети: сеть выявления значимости, центральную исполнительную (фронтально-парieto-альную), сеть пассивного режима, сенсомоторную сеть, а также подкорковые структуры (базальные ганглии, таламус) и мозжечок.

Указанные изменения можно связать с действием костюма *Reforma-ТЭКТ*. Проприоцептивная стимуляция, создаваемая эластичными тягами костюма, активирует сенсомоторную кору и островковую долю, что объясняет

усиление их взаимосвязей. Нормализация мышечного тонуса снижает патологическую афферентацию от мышц, позволяя ослабить гиперконнективность базальных ганглиев и мозжечка. Наконец, стабилизация суставов улучшает качество сенсорной информации, способствуя более точной работе сети выявления значимости и эффективному перераспределению нейронных ресурсов, необходимому для формирования новых, более «экономичных», моторных паттернов.

Наши результаты согласуются с данными других исследований, показывающих возможность модуляции сетей покоя в ответ на различные вмешательства, включая двигательную терапию и транскраниальную магнитную стимуляцию [19–21]. Найденная нами связь между клиническими и нейрофизиологическими изменениями подтверждает предположение о том, что фМРТ покоя может служить объективным маркером нейропластичности при ДЦП [22, 23, 25].

Ограничения исследования. К основным ограничениям следует отнести небольшой размер выборки и отсутствие контрольной группы (например, группы, получающей стандартную лечебную физкультуру без костюма). Это не позволяет однозначно утверждать, что все наблюдаемые эффекты вызваны исключительно применением костюма. Кроме того, гетерогенность проявлений ДЦП даже в рамках одной формы может влиять на результаты.

Направления будущих исследований. Перспективным является проведение рандомизированных контролируемых исследований с большим числом участников. Также представляет интерес долгосрочное наблюдение за пациентами для оценки устойчивости выявленных нейропластических изменений и изучение влияния терапии на другие сети покоя (например, сети внимания) [24].

Заключение

Реабилитация в нейрореабилитационном костюме у детей с ДЦП способствует комплексной реорганизации функциональных сетей – нормализации патологической подкорковой гиперконнективности (базальные ганглии-мозжечок), усилению нисходящего контроля через салиентную

сеть и орбитофронтальную кору, оптимизацию взаимодействия крупных сетей (РСП, СМС).

Эти изменения свидетельствуют о значительном нейропластическом потенциале мозга детей с ДЦП и подтверждают влияние проприоцептивно-ориентированной реабилитации в нейрореабилитационном костюме на реорганизацию как моторных, так и когнитивно-регуляторных нейронных сетей.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. **Conflict of interest.** The author declares no conflict of interest.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки. **Financing.** The study was performed without external funding.

Соблюдение прав пациентов и правил биоэтики. Все пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании. Исследование выполнено в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации (в ред. 2013 г.).

Compliance with patient rights and principles of bioethics. All patients gave written informed consent to participate in the study. The study was carried out in accordance with the requirements of the World Medical Association Declaration of Helsinki (updated in 2013).

Литература / References

- Paul S., Nahar A., Bhagawati M., Kunwar A. A Review on Recent Advances of Cerebral Palsy. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 2022. Doi: 10.1155/2022/2622310.
- Шавырин И. А., Кешисьян Р. А., Филижанко Т. В. и др. Результаты ортопедо-хирургической коррекции нейrogenных деформаций конечностей и позвоночника у детей с детским церебральным параличом // Рос. вестн. перинатологии и педиатрии. 2025. Т. 70, № 3. С. 49–53. [Shavyrin I. A., Keshishyan R. A., Filizhenko T. V. et al. Results of orthopedic-surgical correction of neurogenic deformities of the limbs and spine in children with cerebral palsy. *Russian Bulletin of Perinatology and Pediatrics*. 2025;70(3):49–53. (In Russ.).] Doi: g/10.21508/1027-4065-2025-70-3-49-53.
- Федеральная служба государственной статистики rosstat.gov.ru 2023. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 12.10.2025).
- Ларина Н. В., Павленко В. Б., Корсунская Л. Л. и др. Возможности реабилитации детей с синдромом ДЦП с применением роботизированных устройств и биологической обратной связи // Бюл. сибир. мед. 2020. Т. 19, № 3. С. 156–165. [Larina N. V., Pavlenko V. B., Korsunskaya L. L. et al. Opportunities for the rehabilitation of children with cerebral palsy using robotic devices and biofeedback. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2020;19(3):156–156. (In Russ.).] Doi: <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2020-3-156-165>.
- Loffi R. G., Souto D. O., Cruz T. K. F., Lima A. F. B. D., Rocha F. R. M. C., Barreto S. R., Santana P. A. N., Nascimento A. A. A. C., Haase V. G. Narrative Review of the Theoretical–Methodological Foundations of the TREINI Program. *Children*. 2024;(11):1181. Doi: 10.3390/children11101181.
- Bar-Haim S., Harries N., Belokopytov M., Frank A., Copeliovitch L., Kaplanski J., Lahat E. Comparison of efficacy of Adeli suit and neurodevelopmental treatments in children with cerebral palsy. *Dev. Med. Child Neurol*. 2006;(48):325–330. Doi: 10.1017/S0012162206000727.
- Awad L. N., Kudzia P., Revi D. A., Ellis T. D., Walsh C. J. Walking faster and farther with a soft robotic exosuit: Implications for post-stroke gait assistance and rehabilitation. *IEEE Open J Eng Med Biol*. 2020;(1):108–115. Doi: 10.1109/ojemb.2020.2984429. EPMID: 33748765; PMID: PMC7971412.
- Литус А. Ю. Лучшие отечественные технические средства реабилитации. Костюм-тренажер «REFORMA-ТЭКТ» // Доступная среда. 2021. № 1. С. 122–125. [Litus A. Yu. The Best Domestic Rehabilitation Technical Means. Training Suit “REFORMA-TEKT”. Accessible Environment. 2021;(1):122–125. (In Russ.).]
- Paul S., Nahar A., Bhagawati M., Kunwar A. J. A Review on Recent Advances of Cerebral Palsy. *Oxid Med Cell Longev*. 2022;(2022):2622310. Doi: 10.1155/2022/2622310. PMID: 35941906; PMID: PMC9356840.
- Weinberger R., Warken B., König H., Vill K., Gerstl L., Borggraefe I., Heinen F., von Kries R., Schroeder A. S. Three by three weeks of robot-enhanced repetitive gait therapy within a global rehabilitation plan improves gross motor development in children with cerebral palsy – a retrospective cohort study. *Eur J Paediatr Neurol*. 2019;23(4):581–588. Doi: 10.1016/j.ejpn.2019.05.003. PMID: 31155454.
- Feitosa J. A., Fernandes C.A., Casseb R.F., Castellano G. Effects of virtual reality-based motor rehabilitation: a systematic review of fMRI studies. *J Neural Eng*. 2022;19(1). Doi: 10.1088/1741-2552/ac456e. PMID: 34933281.
- Vallinoja J., Nurmi T., Jaatela J., Wens V., Bourguignon M., Mäenpää H., Piitulainen H. Functional connectivity of sensorimotor network is enhanced in spastic diplegic cerebral palsy: A multimodal study using fMRI and MEG. *Clin Neurophysiol*. 2024;(157):4–14. Doi: 10.1016/j.clinph.2023.10.014. PMID: 38006621.
- Wang S., Zhang L., Yang Z., Liu S., Wang X., Li Y., Xu Y., Zhao W. The unique characteristics of extraversion: A systematic review and coordinate-based meta-analysis of resting state functional magnetic resonance imaging studies. *Brain Res Bull*. 2025;(229):111454. Doi: 10.1016/j.brainresbull.2025.111454. PMID: 40609701.
- Lee S. W., Bulea T. C., Kline J. E., Damiano D. L. Dynamic Task-Related Changes in Electroencephalography Brain Connectivity During a Button-Press Task in Children with and Without Bilateral Cerebral Palsy. *Brain Connect*. 2025;15(4):162–174. Doi: 10.1089/brain.2024.0096. PMID: 40366203; PMID: PMC12223383.
- Boerwinkle V. L., Sussman B. L., de Lima Xavier L., Wyckoff S. N., Reuther W., Krueger M. C., Arhin M., Fine J. M. Motor network dynamic resting state fMRI connectivity of neurotypical children in regions affected by cerebral palsy. *Front Hum Neurosci*. 2024;(18):1339324. Doi: 10.3389/fnhum.2024.1339324. PMID: 38835646; PMID: PMC11148452.
- Ashtiyani M., Moradi Birgani P., Soleimani M., Jameie S. B., Shahrokhi A., Mirbagheri M. M., Deevband M. R. Corpus Callosum Functional Activities in Children with Cerebral Palsy. *J Biomed Phys Eng*. 2024;14(1):21–30. Doi: 10.31661/jbpe.v0i0.2106-1354. PMID: 38357606; PMID: PMC10862116.
- Chegina D.S. et al. Functional changes in neural networks of the brain in patients with spastic diplegia after translingual neurostimulation. *Diagnostic Radiology and Radiotherapy*. 2021;12(3):26–34. Doi: 10.22328/2079-5343-2021-12-3-26-34.
- Vallinoja J. et al. Functional connectivity of sensorimotor network is enhanced in spastic diplegic cerebral palsy: a multimodal study using fMRI and MEG. *Clin-*

- ical Neurophysiology. 2024;(157):4–14. Doi: 10.1016/j.clinph.2023.10.014.
19. Huang X. *et al.* Brain functional connectivity and activity during motor control in children with cerebral palsy: a pilot cross-sectional fNIRS study. *Translational Pediatrics*. 2025;14(5):812–823. Doi: 10.21037/tp-2025-11.
 20. Khan O. A. *et al.* Assessment of cortical activity, functional connectivity, and neuroplasticity in cerebral palsy using functional near-infrared spectroscopy: a scoping review. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2025;67(7):875–891. Doi: 10.1111/dmcn.16238.
 21. Qi W., Zhang Y., Su Y., Hui Z., Li S., Wang H., Zhang J., Shi K., Wang M., Zhou L., Zhu D. Exploring cortical excitability in children with cerebral palsy through lower limb robot training based on MI-BCI. *Sci Rep*. 2025;15(1):12285. Doi: 10.1038/s41598-025-96946-z. PMID: 40210930; PMCID: PMC11986060.
 22. Antoine Légaré *et al.* Structural and genetic determinants of zebrafish functional brain networks. *Sci. Adv*. 2025. Doi: 10.1126/sciadv.adv7576.
 23. Filho C. A. S. Reorganization of Resting-State EEG Functional Connectivity Patterns in Children with Cerebral Palsy Following a Motor Imagery Virtual-Reality Intervention. *Applied Sciences*. MDPI AG. 2021. Doi: 10.3390/AP11052372.
 24. Xue Z., Zhang W., Zhou N., Ma P., Yuan K., Zheng P., Li J., Chang J. Effects of virtual reality motor games on motor skills in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. *Front Psychol*. 2025;(15):1483370. Doi: 10.3389/fpsyg.2024.1483370. PMID: 39881687; PMCID: PMC11776641.
 25. Damiano D. L., Pekar J. J., Mori S., Faria A. V., Ye X., Stashinko E., Stanley C. J., Alter K. E., Hoon A. H., Chin E. M. Functional and Structural Brain Connectivity in Children with Bilateral Cerebral Palsy Compared to Age-Related Controls and in Response to Intensive Rapid-Reciprocal Leg Training. *Front Rehabil Sci*. 2022;(3):811509. Doi: 10.3389/fresc.2022.811509. PMID: 36189020; PMCID: PMC9397804.

Сведения об авторах

Фатима Альбековна Тлиазова – аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия);

Александр Юрьевич Ефимцев – доктор медицинских наук, профессор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия);

Геннадий Евгеньевич Труфанов – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия);

Наталья Евгеньевна Иванова – доктор медицинских наук, профессор, заслуженный врач Российской Федерации, член-корреспондент Российской академии естественных наук, академик Академии медико-технических наук, действительный член Петровской академии наук и искусств, член Правления Ассоци-

ации нейрохирургов России, член Правления Ассоциации нейрохирургов им. И. С. Бабчина, член Географического общества России, врач функциональной и ультразвуковой диагностики, зав. научным отделом Российского научно-исследовательского нейрохирургического института им. проф. А. Л. Поленова – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» (Санкт-Петербург, Россия); профессор кафедры неврологии и психиатрии Института медицинского образования Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия);

Дария Дмитриевна Дорохова – ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия);

Анатолий Геннадьевич Левчук – инженер Отделения магнитно-резонансной томографии Национального медицинского исследовательского центра им. В. А. Алмазова (Санкт-Петербург, Россия).

Information about the authors

Fatima A. Tlizamova – Postgraduate Student at the Department of Radiology and Medical Imaging with Clinic, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Alexander Yu. Efimtsev – Dr. of Sci. (Med.), Professor at the Department of Radiology and Medical Imaging with Clinic, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Gennady Y. Trufanov – Dr. of Sci. (Med.), Full Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Head at the Department of Radiology and Medical Imaging with Clinic, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Natalya E. Ivanova – Dr. of Sci. (Med.), Full Professor, Distinguished Doctor of the Russian Federation, Corresponding Member of the Russian Academy of Medical and Technical Sciences, Academician of the Academy of Medical and Technical Sciences, Full Member of the Petrovskaya

Academy of Sciences and Arts, Member of the Board of the Association of Neurosurgeons of Russia, Member of the Board of the Babchin Association of Neurosurgeons, Member of the Geographical Society of Russia, Doctor of Functional and Ultrasound Diagnostics, Head at the Scientific Department of Russian Neurosurgical Institute, Head at the Scientific Department, Polenov Neurosurgery Institute – the branch of Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia); Professor at the Department of Neurology and Psychiatry, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Daria D. Dorokhova – Resident Physician at the Department of Radiology and Medical Imaging with Clinic, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia);

Anatoly G. Levchuk – Engineer at the Magnetic Resonance Imaging Department, Almazov National Medical Research Centre (St. Petersburg, Russia).

Поступила в редакцию 03.07.2025

Поступила после рецензирования 20.08.2025

Принята к публикации 10.09.2025

Received 03.07.2025

Revised 20.08.2025

Accepted 10.09.2025