

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ В.А. АЛМАЗОВА» МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

На правах рукописи

ТЛИЗАМОВА
ФАТИМА АЛЬБЕКОВНА

МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ
НЕЙРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ КОННЕКТОМА ГОЛОВНОГО
МОЗГА У ПАЦИЕНТОВ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ В
ПОЗДНЕЙ РЕЗИДУАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
ТЕХНОЛОГИЙ ПРОПРИОЦЕПТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ

3.1.25. Лучевая диагностика

3.1.24. Неврология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата медицинских наук

Научные руководители:

доктор медицинских наук, доцент

Ефимцев Александр Юрьевич

доктор медицинских наук, профессор

Иванова Наталия Евгеньевна

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КОННЕКТОМА ГОЛОВНОГО МОЗГА И МЕТОДОВ ЛЕЧЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)	18
1.1 Современные представления о детском церебральном параличе.....	18
1.2 Нейробиологические механизмы спастической диплегии	27
1.3 Коннектом головного мозга при детском церебральном параличе	35
1.4 Нейровизуализационные методы оценки коннектома при детском церебральном параличе: возможности и ограничения.....	40
1.5 Современные методы нейрореабилитации при детском церебральном параличе	46
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	55
2.1 Дизайн исследования и характеристика пациентов	55
2.2 Клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов	60
2.3 Методики комплексной магнитно-резонансной томографии головного мозга.....	63
2.4 Обработка исходных данных и программное обеспечение.....	70
2.5 Методика лечения	76
2.6. Методы статистического анализа.....	79
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	82
3.1 Результаты традиционной магнитно-резонансной томографии.....	82
3.2 Результаты функциональной магнитно-резонансной томографии в состоянии покоя	88
3.3 Результаты диффузионной магнитно-резонансной томографии	101
3.4 Результаты клинико-неврологического обследования	105
3.5 Интегральный анализ клинико-нейровизуализационных данных.....	118
ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	125

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
ВЫВОДЫ	144
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	145
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	146
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	148
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	150

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Детский церебральный паралич (ДЦП) представляет собой гетерогенную группу непрогрессирующих нарушений развития движений и постурального контроля, обусловленных повреждением или нарушением формирования головного мозга в раннем периоде онтогенеза (Кольцов А.А., Джомардлы Э.И. 2021; Колесникова Е.В. и соавт. 2024; Patel D.R. et al., 2020; Novak I. et al., 2025). Несмотря на непрогрессирующий характер первичного поражения центральной нервной системы, клинические проявления заболевания остаются динамичными и изменяются по мере созревания головного мозга и реализации механизмов нейропластичности (Игнатова Т.С. 2021; Немкова С.А., Болдырев В.Г. 2024; Sadowska M., 2020; Novak I. et al., 2025).

В настоящее время ДЦП рассматривается не только как двигательное расстройство, но и как заболевание нарушенной структурно-функциональной организации головного мозга, сопровождающееся двигательными, сенсорными и когнитивными нарушениями (Селивёрстов Ю.А., Шарков А.А. 2021; Колесникова Е.В. и соавт., 2024; Hollung S.J., 2020). ДЦП остаётся одной из ведущих причин стойкой инвалидизации детского населения (Колесникова Е.В. и соавт. 2024; Моисеева К.Е. и соавт., 2024; McIntyre S., 2022; Novak I. et al., 2025). Наиболее распространённой клинической формой является спастическая диплегия, наиболее часто ассоциированная с перивентрикулярным поражением белого вещества (Аникин А.В. и соавт. 2021; Кирилочев О.К. и соавт. 2023; Agut T. et al., 2020; Cha J.H. et al., 2022).

Выраженность неврологического дефицита нередко существенно различается у пациентов со сходным объёмом структурного поражения, что свидетельствует о недостаточности исключительно морфологического подхода к интерпретации клинических проявлений заболевания (Головина Ю.А., 2024; Gelkop N. et al., 2025; Kumar R. et al., 2025). В связи с этим в последние годы ДЦП всё чаще рассматривается с позиций коннектомного подхода как заболевание

нарушенной сетевой организации головного мозга, при котором клинические проявления определяются не только локальным повреждением отдельных структур, но и изменением взаимодействия между нейронными сетями, обеспечивающими двигательную, сенсорную и когнитивную деятельность (Головина Ю.А. 2024; Gelkop N. et al., 2025; Kumar R. et al., 2025; Буккиева Т.А. и соавт., 2022; Коптева Ю.П. и соавт., 2023; Jacobs N.P.T. et al., 2023; Hong Y. et al., 2023). Особый интерес представляет изучение нейропластичности как одного из ключевых механизмов компенсации неврологического дефицита при ДЦП, однако закономерности нейросетевой реорганизации при спастической диплегии остаются недостаточно изученными (Игнатова Т.С., 2021; Анпилогова К.С. и соавт., 2021; Damiano D.L., 2022; Павленко В.Б. и соавт., 2024; Прошина Е.А. и соавт., 2024; Vallinoja J. et al., 2024; Lee S.W. et al., 2025). Это определяет актуальность поиска объективных нейровизуализационных маркеров заболевания.

Степень разработанности темы

Традиционная магнитно-резонансная томография позволяет выявлять характерные морфологические изменения головного мозга при ДЦП, однако данные структурной визуализации не всегда объясняют выраженность двигательных нарушений и клиническую вариабельность заболевания (Клюев Е.А. и соавт., 2021; Романов П.А. и соавт., 2023; Horber V. et al., 2020; Himmelmann K. et al., 2021; Jacobs N.P.T., 2023; Salomon I. et al., 2024).

Развитие методов диффузионной МРТ и функциональной МРТ покоя существенно расширило возможности прижизненного изучения структурной и функциональной организации головного мозга (Чегина Д.С. и соавт., 2021; Абдулаев Ш.К. и соавт., 2024; Martinie O. et al., 2023; Biswal B.B. et al., 2025). Показатели диффузионной МРТ отражают состояние проводящих путей белого вещества и коррелируют с выраженностью двигательных нарушений у пациентов с ДЦП (Кремнева Е.И. и соавт., 2020; Никогосова А.К. и соавт., 2022; Yuan W. et al., 2024; Погосбекян Э.Л. и соавт., 2023). Методика функциональной МРТ покоя позволяет изучать коннективность крупномасштабных сетей мозга без выполнения

активной задачи, что особенно ценно в детской популяции и при двигательном дефиците (Маркин К.В., 2023; Абдулаев Ш.К. и соавт., 2024; Biswal B.B. et al., 2025). У детей с ДЦП выявлены нарушения функциональной связности сенсомоторных и ассоциативных сетей, а при спастической диплегии — изменения сенсомоторной сети, связанные с выраженностью двигательного дефицита и процессами нейропластичности (Чегина Д.С. и соавт., 2021; Игнатова Т.С., 2021; Vallinoja J. et al., 2024; Lee S.W. et al., 2025).

Современные методы нейровизуализации всё чаще рассматриваются как инструмент объективной оценки нейропластичности, а изменения параметров функциональной коннективности и микроструктуры белого вещества могут сопровождаться клиническим улучшением и отражать процессы функциональной реорганизации головного мозга (Анпилогова К.С. и соавт., 2021; Игнатова Т.С., 2021; Павленко В.Б. и соавт., 2024; Damiano D.L., 2022).

Несмотря на значительный интерес к проблеме коннектома при ДЦП, результаты исследований остаются неоднозначными. Отсутствуют данные о комплексной оценке структурной и функциональной коннективности головного мозга и её связи с клинико-неврологическими показателями у детей со спастической диплегией в динамике лечения, включая применение технологии проприоцептивной коррекции посредством костюма «Reforma-ТЭКТ».

Цель исследования

Оптимизация диагностики нейропластических изменений головного мозга у детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии детского церебрального паралича на основе мультимодальной магнитно-резонансной томографии до и после применения технологий проприоцептивного воздействия.

Задачи исследования

1. Оценить особенности структурной и микроструктурной организации головного мозга при спастической диплегии в поздней резидуальной стадии по

данным мультимодальной магнитно-резонансной томографии, включая количественный анализ показателей диффузионной МРТ и характеристику основных проводящих путей белого вещества.

2. Выявить особенности функциональной организации головного мозга при спастической диплегии по данным функциональной магнитно-резонансной томографии покоя на основе анализа нейропластических изменений внутрисетевой и межсетевой коннективности.

3. Оценить динамику нейропластических изменений структурного и функционального коннектома и клинико-неврологических характеристик у детей со спастической диплегией до и после использования технологии проприоцептивной коррекции (посредством нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ»).

4. Определить взаимосвязь между изменениями нейровизуализационных и клинико-неврологических характеристик при повторном обследовании пациентов после использования технологии проприоцептивной коррекции для выявления объективных маркеров нейропластичности и повышения точности диагностики функционального состояния головного мозга.

Научная новизна

Научная новизна исследования заключается в получении новых данных о структурно-функциональной организации головного мозга и механизмах нейропластичности у детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии детского церебрального паралича на основе применения мультимодальной магнитно-резонансной томографии.

Мы провели продольное когортное исследование на репрезентативной группе из 178 детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии. Ключевая задача состояла в том, чтобы выйти за рамки привычного анализа локальных морфологических нарушений и оценить, как перестраивается коннектом головного мозга на системном уровне. Впервые использовали унифицированный мультимодальный МР-протокол с двумя временными

точками, что позволило проследить динамику структурных, микроструктурных и функциональных изменений.

Чтобы обеспечить чистоту сравнения, мы сформировали две клинически сопоставимые группы — основную (95 человек) и контрольную (83 человека). Тщательная проверка показала, что по всем значимым неврологическим, функциональным и морфометрическим параметрам группы не различались ($p > 0,05$), поэтому любые выявленные нами сдвиги можно смело связывать с процессом нейросетевой реорганизации, а не с исходной тяжестью дефекта.

Методологически работа опиралась на строго регламентированный протокол МР-сканирования на томографе 1,5 Тл: мы сочетали структурную съёмку, диффузионную МРТ с 36 направлениями градиентов ($b=1000$ с/мм²) и функциональную МРТ покоя в режиме BOLD-EPI. Постобработку выполняли в средах MATLAB/SPM12 с расширением CONN Toolbox и в пакете DSI Studio — это обеспечило стандартизацию анализа на всех этапах.

Наиболее интересные результаты касаются салиентной сети. Мы зафиксировали статистически значимое усиление функциональных связей правой передней островковой доли с правой лобной покрывкой, скорлупой, задней теменной корой и левой верхней височной извилиной. Одновременно с этим отмечалось ослабление её связи с левой затылочной областью. Такая разнонаправленная динамика, на наш взгляд, уточняет роль салиентной сети в процессах сенсомоторной интеграции и постуральной регуляции.

Полученные данные позволяют предположить, что мощный дополнительный афферентный поток, генерируемый при использовании нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ», может служить ключевым драйвером перестройки функциональной коннективности тех церебральных сетей, которые отвечают за двигательный контроль и поддержание равновесия.

Впервые охарактеризованы особенности подкорково-мозжечковой организации при спастической диплегии. Выявлено статистически значимое снижение функциональной связности левого хвостатого ядра с правой VI долей мозжечка ($T(56)=-4,64$; $p=0,000021$), левой VI долей мозжечка ($T(56)=-3,59$;

$p=0,000689$) и правыми IV–V долями ($T(56)=-3,49$; $p=0,000936$). Что расширяет представления о вкладе мозжечково-подкорковых взаимодействий в формирование и компенсацию двигательного дефицита при детском церебральном параличе.

В работе впервые показано, что параметры функциональной коннективности и фракционной анизотропии отражают выраженность двигательного дефицита и сопровождают процессы нейропластической реорганизации ЦНС после курса проприоцептивной коррекции. При этом повышение фракционной анизотропии в комиссуральных и ассоциативных трактах, включая мозолистое тело и нижний продольный пучок, достигало статистической значимости ($p \leq 0,01$). Что свидетельствует о микроструктурной перестройке белого вещества головного мозга.

Нам было важно проверить, насколько объективные МРТ-данные согласуются с клинической картиной. В ходе анализа мы выявили ряд устойчивых связей между параметрами структурно-функциональной организации мозга и динамикой состояния пациентов. Улучшение постурального контроля шло рука об руку с ростом связности мозжечка с корой ($\rho = 0,58$; $p\text{-FDR} = 0,007$), а также с усилением его взаимодействия с сенсомоторной зоной ($\rho = 0,60$; $p\text{-FDR} = 0,005$); кроме того, значимо возросла коннективность между первичной моторной областью и дополнительной моторной зоной ($\rho = 0,56$; $p\text{-FDR} = 0,009$). Что касается спастичности - её снижение сопровождалось, во-первых, ослаблением функциональной связи хвостатого ядра с мозжечком ($\rho = -0,66$; $p\text{-FDR} = 0,002$), а во-вторых, увеличением фракционной анизотропии в ассоциативных трактах ($\rho = -0,55$; $p\text{-FDR} = 0,010$). В свою очередь, прогресс в мануальной сфере коррелировал с повышением анизотропии в мозолистом теле ($\rho = -0,52$; $p\text{-FDR} = 0,015$) и с усилением связности внутри сенсомоторной сети ($\rho = -0,50$; $p\text{-FDR} = 0,019$).

Эти результаты существенно дополняют современные представления о том, как формируется и компенсируется неврологический дефицит при спастической диплегии. Мы связываем выявленные изменения с эффектами курса

проприоцептивной коррекции, которую проводили с использованием костюма «Reforma-ТЭКТ». На наш взгляд, именно усиленный афферентный поток, создаваемый этой технологией, служит пусковым механизмом нейропластической перестройки, затрагивающей ключевые церебральные сети.

Полученные результаты позволили расширить современные представления о патофизиологических механизмах формирования и компенсации неврологического дефицита у детей со спастической диплегией после использования технологии проприоцептивной коррекции (посредством нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ»), направленной на усиление афферентного сенсомоторного потока и активацию механизмов нейропластической реорганизации церебральных сетей.

Впервые установлено, что клинико-неврологические проявления спастической диплегии в поздней резидуальной стадии связаны не только с последствиями структурного повреждения головного мозга, но и с особенностями его структурно-функциональной организации, при этом параметры структурной и функциональной коннективности ассоциированы с выраженностью двигательного дефицита и отражают процессы нейропластической реорганизации центральной нервной системы, сопровождающиеся улучшением клинико-неврологического статуса.

Полученные данные обосновывают использование мультимодальной магнитно-резонансной томографии для комплексной оценки церебрального коннектома, объективизации тяжести неврологического дефицита, оценки реабилитационного потенциала и прогнозирования функционального восстановления у детей со спастической диплегией, а также создают предпосылки для разработки персонализированных подходов к их ведению в клинической неврологии и лучевой диагностике.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении современных представлений о патогенетических механизмах спастической

диплегии как клинической формы детского церебрального паралича, в основе которой лежат не только последствия первичного перинатального повреждения головного мозга, но и нарушения структурно-функциональной организации церебрального коннектома. Полученные результаты подтверждают современные концепции ДЦП как заболевания нарушенной коннективности и дополняют данные отечественных и зарубежных исследований (Немкова С.А., Игнатова Т.С., Павленко В.Б., Jacobs N.P.T., Damiano D.L., Vallinoja J., Lee S.W.) о роли нейропластических процессов в формировании клинического фенотипа заболевания и реализации восстановительного потенциала центральной нервной системы.

Мы пришли к выводу, что выраженность двигательных нарушений складывается не только из объёма и локализации очага поражения белого вещества. Огромную роль играет то, как перестраиваются крупные нейронные сети: сенсомоторная, салиентная, фронтопариетальная и сеть пассивного режима. Наши результаты по-новому высвечивают значение межсетевых взаимодействий, связей подкорковых образований с мозжечком, орбитофронтальной коры и сети выявления значимости для сенсомоторной интеграции, моторного обучения, поддержания позы и компенсации неврологических нарушений у детей со спастической диплегией ($p < 0,05$).

Кроме того, мы обратили внимание, что нейропластические изменения не ограничиваются двигательной сферой. Они затрагивают и когнитивно-моторные аспекты деятельности - например, чтение, зрительно-пространственное восприятие и графомоторные навыки. Это лишний раз подтверждает, что реорганизация при спастической диплегии имеет системный, многоуровневый характер.

Теоретически значимым является установление взаимосвязей между показателями структурной и функциональной коннективности головного мозга и клинико-неврологическими характеристиками пациентов до и после использования технологии проприцептивной коррекции, подтверждающие значимую роль нарушений церебрального коннектома в формировании и динамике

двигательного дефицита при спастической диплегии. Впервые показано, что показатели функциональной коннективности и фракционной анизотропии отражают процессы структурно-функциональной реорганизации головного мозга и ассоциированы с динамикой постурального контроля, спастичности, мануальных функций и объёма движений в суставах. Полученные результаты позволяют рассматривать показатели функциональной коннективности, фракционной анизотропии и их взаимосвязь с клинико-неврологическими характеристиками в качестве перспективных объективных маркеров нейропластичности и динамики клинико-неврологического состояния у детей со спастической диплегией. Практическая значимость работы определяется разработкой и клинической апробацией стандартизированного протокола мультимодальной магнитно-резонансной томографии, включающего структурную МРТ, диффузионную МРТ и функциональную МРТ покоя, позволяющего проводить комплексную оценку структурно-функционального состояния головного мозга у детей со спастической диплегией. Предложенный подход обеспечивает возможность объективизации неврологического дефицита, количественной оценки нарушений церебральной коннективности, мониторинга процессов нейропластичности в динамике лечения, а также дополнительной оценки эффективности реабилитационных вмешательств.

Комплексная оценка клинических, нейровизуализационных и функциональных показателей позволяет дополнительно анализировать динамику отдельных навыков, имеющих значение для социальной адаптации и обучения детей со спастической диплегией.

Полученные результаты могут быть использованы в клинической практике врачей-неврологов, специалистов по медицинской реабилитации и врачей лучевой диагностики для уточнения механизмов двигательных нарушений, оценки реабилитационного потенциала пациентов, персонализации программ лечения и прогнозирования функциональных исходов заболевания. Разработанные алгоритмы постпроцессинговой обработки данных и анализа церебрального коннектома могут быть внедрены в деятельность специализированных центров неврологии, нейрореабилитации и лучевой диагностики.

Методология и методы исследования

Методология исследования базировалась на современных принципах доказательной медицины и системного нейровизуализационного подхода. Работа выполнена в рамках проспективного продольного когортного дизайна с оценкой в разных временных точках и наличием группы сравнения.

Объектом исследования являлись дети со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии. Предмет исследования: структурные и функциональные изменения головного мозга, оцениваемые с помощью мультимодальной МРТ, и их динамика на фоне лечения.

Основные методы:

- клинико-неврологический – стандартизированное неврологическое обследование с использованием шкал и методов оценки двигательного развития, способности удержания позы сидя, функции верхних конечностей, постурального контроля, мышечного тонуса, амплитуды движений в суставах и коммуникативного уровня: GMFCS, Hare/Hallet, MACS, SATCo, Ashworth Scale, гониометрии и CFCS;

- нейровизуализационный – комплексная МРТ головного мозга на томографе 1,5 Тл, включающая структурную МРТ (T1-ВИ, T2-ВИ, T2-FLAIR, 3D T1-MPRAGE), диффузионно-взвешенную МРТ (36 направлений, $b=1000$ с/мм²) и функциональную МРТ покоя (BOLD-EPI, TR=3000 мс, 120 динамик).

- постпроцессинговый и статистический – обработка данных с использованием программного обеспечения CONN Toolbox (на платформе MATLAB/SPM12) для анализа функциональной коннективности, DSI Studio для трактографии и количественного анализа DTI-параметров, а также методы параметрической и непараметрической статистики (t-критерий, Манна-Уитни, Уилкоксона, GLM, кластерный анализ с коррекцией на множественные сравнения FDR).

Дизайн исследования

Исследование выполнено в формате проспективного продольного

когортного наблюдения, включавшего две временные точки. T0 - до начала лечения и T1 - через месяц после его завершения.

В работу вошли две группы пациентов, сопоставимые по ключевым демографическим и клинико-функциональным параметрам (возраст, пол, уровень по шкале GMFCS, тип структурного поражения). Основная группа (n = 95) помимо стандартной реабилитации посещала занятия в костюме «Reforma-ТЭКТ»; группа сравнения (n = 83) получала только стандартный реабилитационный комплекс. Критерии включения и исключения были четко регламентированы. В обеих временных точках каждому участнику проводили мультимодальную МРТ и клинико-неврологическое обследование по единому протоколу.

Такая организация работы позволила проанализировать внутригрупповую динамику, межгрупповые различия и взаимодействие факторов «время × группа», а значит -корректно выделить специфический эффект технологии проприоцептивной коррекции, реализуемой посредством нейрореабилитационного костюма.

Положения, выносимые на защиту

1. По данным мультимодальной магнитно-резонансной томографии спастическая диплегия у детей в поздней резидуальной стадии детского церебрального паралича характеризуется комплексными нарушениями структурной, микроструктурной и функциональной организации головного мозга, выходящие за пределы первичного очага повреждения.

2. Мультимодальная магнитно-резонансная томография, включающая структурную МРТ, диффузионную МРТ и функциональную МРТ покоя, позволяет выполнять комплексную оценку церебрального коннектома и выявлять изменения структурной и функциональной коннективности, отражающие особенности организации головного мозга при спастической диплегии в динамике наблюдения на фоне комплексного лечения с применением технологий проприоцептивной стимуляции.

3. Изменения показателей структурной и функциональной коннективности головного мозга, выявляемые до и после использования технологии проприоцептивной коррекции (посредством нейрореабилитационного костюма

«Reforma-ТЭКТ»), достоверно связаны с динамикой клинико-неврологических показателей, что подтверждает значимую роль нарушений церебрального коннектома в формировании двигательного дефицита при спастической диплегии и позволяет рассматривать данные показатели в качестве дополнительных объективных нейровизуализационных маркеров процессов нейропластической перестройки.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов исследования определяется репрезентативным объёмом выборки (178 пациентов), сопоставимостью основной группы и группы сравнения по ключевым клинико-демографическим параметрам ($p > 0,05$), использованием сертифицированного оборудования (МРТ 1,5 Тл), применением валидированных клинических шкал и стандартизированных протоколов постобработки данных с контролем качества на всех этапах.

Статистический анализ выполнен с использованием адекватных параметрических и непараметрических методов, включая коррекцию на множественные сравнения (FDR), что обеспечивает обоснованность и надёжность полученных выводов.

Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на ведущих российских и международных конгрессах и конференциях: Невский радиологический форум (Санкт-Петербург, 2024), Всероссийский национальный конгресс лучевых диагностов и терапевтов «Радиология» (Москва, 2024), Всероссийские научно-практические конференции «Поленовские чтения» (Санкт-Петербург, 2024-2025), Конгресс Российского общества рентгенологов и радиологов (Москва, 2023, 2025), а также на заседаниях проблемной комиссии ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Внедрение результатов работы в практику

Полученные результаты внедрены и используются в клинической практике на базе отделений лучевой диагностики №1 и магнитно-резонансной томографии ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России; отделения лучевой диагностики ГБУЗ «Детский городской многопрофильный клинический центр высоких медицинских технологий им. К.А. Раухфуса»; кабинета магнитно-резонансной томографии СПб ГБУЗ «Детская городская больница Святой Ольги»; клиники и отделения лучевой диагностики с кабинетом компьютерной томографии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России.

Личный вклад автора

Автором лично сформулированы и обоснованы актуальность темы диссертации, цель, задачи, научная новизна и практическая значимость работы. Самостоятельно проведён анализ отечественной и зарубежной литературы по изучаемой проблеме. Автором составлена электронная база данных пациентов, проведено клинико-неврологическое обследование детей с ДЦП с применением стандартизированных шкал, выполнено планирование и организация МР-исследований.

Лично автором произведены постпроцессинговая обработка данных структурной, диффузионной и функциональной МРТ, статистический анализ полученных результатов, а также их клинико-нейровизуализационная интерпретация.

Сформулированы выводы и практические рекомендации. Подготовка основных публикаций и написание текста диссертации выполнены автором лично. Доля личного участия составляет 100%.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 187 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, практических рекомендаций, списка

литературы, включающего 62 отечественных и 157 иностранных источников. Работа содержит 19 таблиц и 15 рисунков.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КОННЕКТОМА ГОЛОВНОГО МОЗГА И МЕТОДОВ ЛЕЧЕНИЯ У ПАЦИЕНТОВ С ДЕТСКИМ ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1 Современные представления о детском церебральном параличе

Детский церебральный паралич (ДЦП) — гетерогенная группа состояний, возникающих вследствие повреждения или нарушения развития головного мозга в антенатальный (внутриутробный) и неонатальный (первые 28 дней после рождения) периоды онтогенеза и приводящих к стойким нарушениям моторики, часто сочетающимся с сенсорными, когнитивными и поведенческими расстройствами (Колесникова Е.В. и соавт., 2024).

При работе с пациентами с ДЦП часто сталкиваешься с сопутствующими проблемами: страдает зрение, слух, снижается чувствительность, нередко присоединяется соматическая патология, которая только усугубляет двигательные ограничения и тормозит психомоторное развитие (Hollung S.J., 2020; Galli J., 2025).

Недостаточно рассматривать только внешние клинические формы заболевания. Всё больше внимания уделяют тому, как устроены нейросетевые связи в мозге. Именно они во многом определяют, насколько выражен будет двигательный дефект, какие коморбидные состояния разовьются и как быстро пациент сможет восстановиться. Поэтому в комплексное обследование всё активнее внедряют коннектомику и количественную МРТ (Olusanya B.O., et al., 2023).

Если обратиться к современному определению, которое закреплено в международных подходах SCPE/ICD, ДЦП трактуют как стойкое, но не прогрессирующее нарушение становления движений и поддержания позы. Оно ограничивает повседневную активность и возникает из-за раннего повреждения или аномалии развития мозга (Dan B., 2025).

Само по себе первичное поражение центральной нервной системы

действительно не усугубляется со временем. Однако на практике клиническая картина у детей меняется. По мере роста появляются вторичные ортопедические проблемы, меняется биомеханика, и это может создавать иллюзию ухудшения (Хамроев Ф.Ш., 2024; Новиков В.А., 2025). Этот нюанс сегодня признаётся большинством авторитетных обзоров. ДЦП - это фенотип, который динамически разворачивается на фоне статичного первичного дефекта (Saranti A., Dragoumi P., et al., 2024).

Для меня из этого вытекают два важных практических момента. Во-первых, диагноз ДЦП сам по себе не означает обязательного прогрессирования симптомов, мы не ждём ухудшения просто в силу болезни (Sadowska M., et al., 2020). А во-вторых, оценивая результаты реабилитации, всегда нужно разделять, что связано с настоящей нейропластической перестройкой, а что с вторичными изменениями в мышцах и скелете, с ростом ребёнка и перестройкой двигательных стереотипов (Min J.J., et al., 2020).

В формальной статистике и при кодировании по-прежнему используют МКБ-10 (рубрики G80.0–G80.9), где выделены основные клинические варианты ДЦП (Horber V., 2020). Но этого, на мой взгляд, совершенно недостаточно, чтобы описать реальное состояние пациента. МКБ-10 даёт лишь нозологическую рамку, а для работы нужен многоосевой подход, с указанием клинического типа, топике поражения, функциональных шкал и всего спектра сопутствующих нарушений (Patel D.R., et al., 2020). Без такой комплексной оценки трудно планировать адекватную помощь и прогнозировать результат.

В работах 2024–2025 гг. сохраняется дискуссия о том, следует ли рассматривать ДЦП преимущественно как следствие раннего повреждения мозга или как широкий спектр нарушений нейроразвития, с вариативными механизмами, включающими генетические причины у части пациентов (Janzing A.M., 2024; Sandran N.G., 2024; Arkar Silan U., 2025).

Часть авторов подчёркивает клиническую полезность классического определения ДЦП как стойкого нарушения движений и постурального контроля при непрогрессирующем первичном поражении, поскольку это обеспечивает

стабильность диагностических критериев и сопоставимость клинических выборок. (Hoei-Hansen CE, 2023; Goldsmith S, 2024).

Вместе с тем в работах последних лет усиливается позиция, согласно которой фенотип ДЦП формируется на пересечении раннего повреждения и вариативных траекторий созревания нервной системы, что объясняет гетерогенность моторных и немоторных проявлений, а также различия в потенциале восстановления и ответе на реабилитацию. (Brien M., 2024; Salomon I. 2024).

Это смещает акцент от модели «единой перинатальной травмы» к многофакторной этиологии, при которой клинический фенотип отражает разные траектории раннего повреждения и дальнейшего развития (Pham et al., 2020; Jin S.C. et al., 2020; Novak I. et al., 2025).

Эпидемиология, сроки постановки диагноза, половые различия

Согласно метаанализу McIntyre S. и соавт. (2022), в странах с высоким уровнем дохода (США, Канада, Западная Европа) распространённость ДЦП составляет 1,5–2,5 на 1000 новорождённых, что связывают с развитием неонатальной интенсивной терапии, профилактикой и коррекцией гипоксически-ишемических осложнений, внедрением стандартов наблюдения в перинатальном и постнатальном периодах, а также увеличением выживаемости недоношенных детей (McIntyre S., 2022). В странах с низким и средним уровнем дохода (например, ряд регионов Африки и Южной Азии) показатели достигают 3–4 на 1000, что чаще объясняют ограниченной доступностью акушерско-неонатальной помощи, поздней диагностикой осложнений и меньшими возможностями раннего вмешательства (McIntyre S., 2022).

При этом единая трактовка динамики распространённости ДЦП отсутствует.

Одни авторы рассматривают наблюдаемое снижение показателей в ряде высокодоходных стран как результат улучшения перинатальной помощи, профилактики гипоксически-ишемических осложнений и внедрения программ раннего вмешательства (Андрущенко Н.В., 2024; Hunt R.W., 2024).

Некоторые исследователи указывают, что видимое снижение

распространённости не стоит считать универсальной закономерностью. Оно может маскироваться глубокими сдвигами в структуре выживаемости. Речь идёт о растущей доле выхоженных детей из групп высокого риска, в том числе крайне недоношенных, а также о неизбежных методологических расхождениях. Несовпадении критериев регистрации, сроков постановки диагноза и доступности специализированной помощи (Цечоева Т., 2025; DeMauro S.B., 2024). В таком свете динамику распространённости точнее рассматривать как равнодействующую медицинских, демографических и учётных факторов. Игнорирование этой сложной природы чревато ошибочными выводами, особенно когда анализируются выборки с выраженной клинической неоднородностью.

Хотя в некоторых странах с высоким уровнем дохода действительно намечается тенденция к спаду, говорить о полной стабилизации показателей пока рано (Arnaud C., et al., 2021).

Снижение частоты ДЦП связывают с качественным ростом перинатальной и неонатальной помощи, прежде всего при ведении преждевременно рождённых детей, однако абсолютное число пациентов остаётся клинически значимым (Smithers-Sheedy H., et al., 2022). Это, в частности, объясняется ростом выживаемости новорождённых с экстремально низкой массой тела, относящихся к группе высокого риска по формированию двигательных и когнитивных нарушений, а также усложнением структуры факторов риска (Badawi et al., 2021).

По данным отечественных аналитических публикаций со ссылкой на официальную статистику, показатель впервые зарегистрированных случаев ДЦП среди детей 0–14 лет в 2023 году составлял порядка 21,8 на 100 000 соответствующей возрастной группы, а в 15–17 лет — около 14,4 на 100 000 (Федеральная служба государственной статистики rosstat.gov.ru 2023).

С точки зрения современных международных подходов ДЦП возможно выявлять существенно раньше, чем это реализуется в рутинной практике: подчёркивается возможность идентификации риска уже в возрасте 3–8 месяцев при использовании валидированных инструментов ранней диагностики и динамического наблюдения (Te Velde, 2021).

Средний возраст постановки диагноза составляет 12–18 месяцев в странах с доступом к специализированным центрам; в развивающихся странах диагностика нередко задерживается до 2–4 лет, что снижает эффективность ранней реабилитации (Jahan, 2021).

По данным ряда работ, среди пациентов с ДЦП отмечается некоторое преобладание мальчиков, где-то на 15–20% чаще, особенно при спастической диплегии и гемиплегии. Обычно это объясняют не столько самим полом, сколько комплексом биологических факторов уязвимости и разницей в перинатальных рисках. В любом случае, на первый план всё равно выходят недоношенность, тяжесть поражения и сопутствующие нарушения, пол здесь скорее сопутствующий, а не определяющий момент (Hollung S.J., 2020).

Если смотреть на распределение клинических форм, то спастические варианты (диплегия и тетраплегия) уверенно доминируют, они составляют порядка 70-80% всех случаев. И закономерно, что они гораздо чаще встречаются у глубоко недоношенных детей с массой тела менее 1500 г (McManus V., SCPE, 2022; Skoutelis V.C., 2020; Pascal A., 2020). Дискинетические формы занимают примерно 10-15%, в их генезе обычно фигурируют билирубиновая энцефалопатия или тяжёлая гипоксия у доношенных младенцев. Атактическая же форма, которая встречается в 5-7% случаев, чаще всего обсуждается в связи с генетическими или метаболическими нарушениями (Kitai Y., 2021).

Несмотря на все достижения перинатальной медицины, общая распространённость ДЦП почему-то не снижается пропорционально. В литературе это активно обсуждают (Jöud A., 2020). Мне кажется, наиболее убедительное объяснение связано с тем, что сейчас мы стали выхаживать гораздо больше детей из групп самого высокого риска, с поражением белого вещества и диффузными повреждениями мозга. За счёт этого общий показатель заболеваемости не падает, а вот спектр клинических фенотипов, с которыми мы сталкиваемся, заметно меняется (Parikh N.A., 2020).

Что касается этиологии, тут принято говорить о многофакторности. Причины традиционно делят на пренатальные, перинатальные и постнатальные,

хотя на практике это деление довольно условно (Немкова С.А., 2024). Важно, что сегодня уже хорошо известно: внутриутробные факторы играют огромную роль - по некоторым оценкам, до 70-80% случаев. И перинатальная асфиксия далеко не всегда выступает главной и тем более единственной причиной (Villamor E., 2022). Один из самых дискуссионных вопросов, как именно соотносятся пренатальные и перинатальные механизмы в формировании ДЦП, и однозначного ответа пока нет.

Традиционная клиническая модель длительное время придавала первостепенное значение интранатальной гипоксии и асфиксии, однако современные обзоры и регистры показывают, что «чистая интранатальная асфиксия» объясняет ограниченную долю случаев (Селивёрстов Ю.А., 2021).

Существенный вклад формируется до родов и включает плацентарные нарушения, внутриутробное воспаление, недоношенность и комплекс неблагоприятных воздействий на развивающийся мозг (Хан М.А., 2025).

Следовательно, за одинаковым клиническим диагнозом могут скрываться различные сроки и механизмы поражения, что требует многоосевого описания пациента и более точной интерпретации нейровизуализационных данных.

Ключевые патогенетические механизмы повреждения мозга при ДЦП.

Независимо от исходного этиологического фактора, для настоящего исследования ключевыми являются механизмы, которые формируют повреждение белого вещества и нарушают межрегиональные связи, т.е. те процессы, которые затем отражаются в DTI-метриках и функциональной связности фМРТ покоя (Павленко В.Б., 2024):

Ишемия и гипоксия. Нарушение церебральной перфузии запускает каскад патологических реакций, включающий глутаматную эксайтотоксичность, окислительный стресс и апоптоз нейронов. Современные обзоры по гипоксически-ишемическому поражению мозга у новорождённых рассматривают эти звенья как ключевые в формировании стойкого неврологического дефицита (Tetorou K., 2021).

Нейровоспаление. Воспалительный компонент рассматривается как один из ключевых факторов повреждения незрелого мозга, влияющий на глиальные клетки и процессы миелинизации. При инфекционных процессах и ишемическом повреждении усиливается продукция провоспалительных цитокинов (включая IL-6, TNF- α и др.), что потенцирует нейрональное повреждение и нарушает процессы созревания белого вещества. Вопрос системного и нейровоспаления при ДЦП подробно обсуждается в обзоре Paton et al., (2022).

Нарушение миелинизации. У недоношенных детей типичным морфологическим субстратом является ПВЛ, связанная с уязвимостью олигодендроцитов и расстройством формирования миелина, что приводит к снижению эффективности проведения импульса по двигательным трактам и устойчивому моторному дефициту (Agut T., 2020).

Структурные аномалии развития мозга. Аномалии корковой архитектоники, гипоплазия мозолистого тела и другие пороки развития могут выступать как причиной ДЦП, так и маркером генетически детерминированного варианта с ранним нарушением нейроонтогенеза (Horber V., 2021; Xu Y., Li Y., 2024).

В литературе обсуждается вклад поражения белого вещества как результата гипоксии-ишемии по сравнению с ролью хронического воспаления и «дисматурации» белого вещества при выхаживании недоношенных (Павлинова 2024).

В исследованиях, посвящённых детскому церебральному параличу, можно заметить два основных подхода к объяснению двигательных нарушений. Одни авторы считают ключевым звеном поражение белого вещества — в первую очередь перивентрикулярную лейкомаляцию и нарушения миелинизации. Другие, напротив, выдвигают на первый план аномалии коры и подкорковых образований, а также смешанные повреждения, которые, как показано в недавних работах, во многом формируют немоторную симптоматику и определяют стойкость функциональных ограничений (Кирилочев О.К., 2023; Романов П.А., 2023; Бобылова М.Ю., 2025).

Для нашей работы эта дискуссия отнюдь не умозрительна — она напрямую

влияет на выбор методов. Именно из-за неё мы приходим к необходимости мультимодального подхода: сочетания диффузионной тензорной визуализации и функциональной МРТ в состоянии покоя. Это позволяет отдельно оценить, как устроена структурная связность между отделами мозга и как она работает функционально. Если патология сводится к локальному дефекту проводящих путей, логично предположить, что и корреляты будут носить очаговый характер. Но если речь идёт о распространённом или смешанном поражении, тогда следует ожидать более диффузных изменений на DTI и масштабной перестройки функциональных сетей (Molloy E.J., 2024).

Таким образом, современные данные подтверждают сложный и многофакторный характер этиологии и патогенеза ДЦП, что требует дальнейшего изучения молекулярных и патофизиологических механизмов его развития.

Классификация детского церебрального паралича имеет важное значение для клинической практики и научных исследований, поскольку обеспечивает стандартизированное описание двигательных нарушений, оценку функциональных ограничений, сопоставимость клинических групп и результатов реабилитации (Sharawat I.K., 2022; Riyahi A., 2026).

По характеру двигательных нарушений выделяют спастические, дискинетические (гиперкинетические), атактические и смешанные формы ДЦП, каждая из которых характеризуется специфическими клиническими проявлениями, особенностями течения и прогностической значимостью (Pettersson K., 2025). Наиболее распространённой клинической формой является спастическая диплегия, преимущественно ассоциированная с поражением перивентрикулярного белого вещества головного мозга.

Для характеристики функционального состояния пациентов в настоящее время широко используются международные классификационные системы GMFCS, MACS, CFCS и EDACS, позволяющие комплексно оценивать уровень двигательной активности, функцию верхних конечностей, коммуникацию и особенности питания ребёнка (Koormans C., 2021; Jacobs N.P.T., 2023).

Применение данных шкал обеспечивает стандартизацию клинической оценки и позволяет сопоставлять результаты различных исследований.

Функциональные классификации при детском церебральном параличе применяются повсеместно, однако консенсус по поводу единой системы описания пациентов до сих пор не достигнут. Одни исследователи отводят GMFCS роль основного инструмента для стратификации больных и мониторинга реабилитационных результатов. Другие настаивают на многоосевой оценке, включающей ручные функции, коммуникативные возможности и пищевой статус. Ведь при равном уровне крупной моторики клинические проявления по этим параметрам могут кардинально расходиться (Damiano D.L., 2022; Gelkop N., 2025). В последнее время всё чаще обращаются к модели комплексного функционального профиля, которая синтезирует данные разных классификаций и даёт более объёмную картину состояния ребёнка.

В российской практике по-прежнему востребована классификация К.А. Семёновой с разделением на клинические формы и этапы течения ДЦП. Именно поздняя резидуальная стадия, выделяемая в этой схеме, служит фокусом нашего исследования (Моисеева К.Е., 2024). Сегодня многоосевой клинико-функциональный профиль признаётся наиболее ёмким способом описания пациентов. Он позволяет не только корректно интерпретировать итоги реабилитации, но и сопоставлять клиническую картину с данными нейровизуализации (McIntyre S., 2022; Kumar R., 2025).

Поскольку различные формы ДЦП характеризуются неодинаковыми механизмами формирования двигательного дефицита и различными паттернами структурно-функциональной организации головного мозга, в дальнейшем обзор сосредоточен на спастической диплегии как наиболее распространённой и клинически однородной форме заболевания, что имеет принципиальное значение для корректной интерпретации данных диффузионной и функциональной магнитно-резонансной томографии.

1.2 Нейробиологические механизмы спастической диплегии

Спастическая диплегия занимает особое место среди клинических форм детского церебрального паралича, поскольку характеризуется относительной фенотипической однородностью и типичным патоморфологическим субстратом, связанным преимущественно с поражением белого вещества головного мозга (Кирилочев Олег Константинович, 2023).

По данным регистров и систематических обзоров, спастические формы составляют большинство случаев ДЦП, а диплегия чаще ассоциирована с преждевременным рождением и перивентрикулярными повреждениями (Игнатова Т.С., 2021; Миронова А.К., 2022; Кольцов А.А., Джомардлы Э.И., 2021).

Нейробиологическая основа спастической диплегии формируется на пересечении двух фундаментальных процессов: (1) повреждения и/или незрелости белого вещества с нарушением миелинизации длинных проводящих трактов и (2) нейропластической перестройки моторных и сенсомоторных сетей, которая может носить как адаптивный, так и дезадаптивный характер (Павленко В.Б., Власенко С.В.). С практической точки зрения такое разделение принципиально важно: нарушения миелинизации определяют “структурные ограничения” системы управления движением, тогда как нейропластичность задает “динамический компонент” — потенциал функциональной компенсации и вариативность ответа на реабилитацию. В связи с этим анализ нарушений миелинизации и нейропластических механизмов позволяет не только объяснить клинические феномены спастической диплегии (спастичность, снижение селективного моторного контроля, дискоординацию, постуральную нестабильность), но и обосновать ожидаемые изменения коннектомных метрик и их интерпретацию в контексте лечения (Анпилогова К.С., Чегина Д.С., Игнатова Т.С., 2021).

В современной литературе всё чаще сталкиваешься с вопросом, что всё-таки сильнее влияет на клиническую картину спастической диплегии: грубые структурные нарушения белого вещества или то, как мозг пытается перестроить свою работу. Одни исследователи, например Clewes (2024), настаивают, что

главное это микроструктурный дефицит проводящих путей, особенно кортикоспинального тракта и таламокортикальных связей, и именно он лучше всего предсказывает тяжесть двигательных нарушений. С другой стороны, есть работы (скажем, Khan O.A., 2025), которые показывают, что у пациентов с одинаковой степенью повреждения белого вещества симптомы могут различаться очень сильно, и это уже списывают на компенсаторные механизмы и на то, как по-разному в онтогенезе формируются сенсомоторные стратегии.

Для коннектомных исследований это различие, честно говоря, ключевое. Структурные данные, вроде DTI, дают нам как бы каркас, анатомическую основу. А вот функциональная связность по фМРТ покоя часто оказывается более чутким индикатором того, как конкретный пациент адаптируется к своему дефекту и как он отвечает на терапию. Когда речь идёт о спастической диплегии, самый частый морфологический субстрат это перивентрикулярная лейкомаляция и диффузное поражение белого вещества, особенно у недоношенных детей (Jiang Y., 2025). Но даже при схожем поражении клиника бывает настолько разной, что, как мне кажется, без учёта функциональной динамики просто не обойтись.

Перивентрикулярная область на поздних сроках гестации и в раннем постнатальном периоде становится особенно ранимой - и для этого есть свои причины. Во-первых, она относится к областям “водораздельного” кровоснабжения, где перфузия более вариабельна и чувствительна к системным колебаниям артериального давления, газообмена и воспалительных факторов (Аникин А.В., 2021). Во-вторых, в гестационном промежутке примерно 24–34 недель наблюдается высокая концентрация пре-олигодендроцитов, необходимых для последующего формирования миелина; эти клетки отличаются повышенной чувствительностью к гипоксически-ишемическим и воспалительным воздействиям, включая оксидативный стресс, эксайтотоксичность и цитокин-опосредованное повреждение (Павлинова Е.Б., 2024). В результате патологические влияния, даже умеренные по выраженности, способны нарушать критические этапы созревания белого вещества и приводить к стойкой гипомиелинизации и микроструктурной дезорганизации длинных проводящих путей.

Классическая ПВЛ сочетает очаговые некротические изменения рядом с боковыми желудочками и диффузный компонент — глиоз, нарушения организации аксональных пучков, снижение плотности и упорядоченности волокон. Для коннектомного анализа важным является то, что такие микроструктурные изменения не всегда “видны” на стандартных МР-последовательностях как крупные очаги, но могут отчетливо проявляться в данных диффузионной МРТ: снижением фракционной анизотропии (FA), увеличением средней диффузивности (MD), а также ростом радиальной диффузивности (RD), что интерпретируется как отражение нарушений миелинизации и/или сниженной организованности пучков (Чегина Д.С., 2021).

Таким образом, перивентрикулярное поражение белого вещества является ключевым механизмом, связывающим раннее повреждение мозга и последующие стойкие нарушения структурной связанности в моторных сетях.

Вместе с тем следует отметить, что не все случаи спастической диплегии могут быть объяснены исключительно перивентрикулярной лейкомаляцией. В ряде работ показано, что у части пациентов выявляются смешанные или атипичные паттерны поражения (диффузная микроструктурная дисорганизация белого вещества, вовлечение подкорковых структур, вариации кортикальной морфологии), что может отражать различия этиологических факторов и времени повреждения (Liu C., 2024). Спастическую диплегию, по мнению ряда исследователей, имеет смысл трактовать не как единую морфологическую модель, а скорее как клинический фенотип, складывающийся при различных вариантах поражения, но объединяемый общими нарушениями сетевого моторного контроля (Berry J.G., 2025).

Кортикоспинальный тракт (КСТ) - центральное звено произвольной двигательной активности, относящееся к пирамидной системе. При спастической диплегии его дисфункция проявляется прежде всего снижением избирательного моторного управления и доминированием патологических синергий в нижних конечностях (Клюев Е.А., Шейко Г.Е., 2021). Почему страдают преимущественно ноги. Ответ кроется в топографии проводящих путей. У недоношенных детей КСТ

проходит в тесной близости от боковых желудочков, причём латеральные волокна, иннервирующие нижние конечности, располагаются особенно уязвимо. При перивентрикулярной лейкомаляции эти проводники поражаются избирательно, тогда как волокна к рукам сохраняются в большей степени. Так нейроанатомия напрямую объясняет классический диплегический паттерн (Миронова А.К., 2022).

Часть авторов указывает на существенную роль нарушений сенсомоторной интеграции и постурального контроля. Ходьба и поддержание вертикальной позы требуют гораздо более сложной координации распределённых нейросетей, чем изолированные движения рук в облегчённых условиях (Власенко С.В., 2023). Дополнительный вклад вносят вторичные костно-мышечные деформации и биомеханические ограничения. Они нарастают быстрее именно в нижних отделах, усугубляя функциональное доминирование ножной симптоматики (Мустафаева А.Р., 2025). Таким образом, диплегию логично рассматривать как сложный итог двух факторов. Топографически обусловленного структурного дефицита и возрастного закрепления постурально-локомоторных нарушений.

Миелинизация же - тот базовый процесс, без которого невозможна быстрая и синхронная передача импульсов по длинным проводящим путям. При гипомиелинизации и микроструктурной дезорганизации белого вещества страдают сразу несколько параметров проведения: скорость, точность временной синхронизации и “энергетическая надёжность” передачи сигнала (Фильченко И.А., 2022; Черепанова А. В., 2024).

В контексте МР-коннектомики нарушение миелинизации в КСТ и ассоциированных проекционных путях может выявляться как локальными изменениями DTI-показателей в стволе и внутренней капсуле, так и как снижение “силы” структурных связей между моторной корой и спинномозговыми мишенями при построении структурного коннектома. Современные подходы трактографии, несмотря на известные ограничения, позволяют оценивать целостность и вероятностную плотность пучков, а также сопоставлять их с уровнем двигательных функций и показателями клинических шкал (Каньшина Д.С., 2024; Федотова И.Р.,

2022).

Таким образом, повреждение и недоразвитие пирамидных путей при спастической диплегии является одним из наиболее значимых “структурных узлов”, определяющих как симптоматику, так и изменения структурной сети мозга.

Клинически спастичность определяется как скорость-зависимое повышение мышечного тонуса при растяжении и повышение сухожильных рефлексов. В современной нейрофизиологической модели спастичность рассматривается как следствие нарушения баланса возбуждающих и тормозных влияний в нисходящих моторных системах, а также изменений сегментарной рефлекторной регуляции (Катунина Е.А. 2021; Therkildsen E.R., 2025).

При повреждении кортикоспинального тракта снижается эффективность “точного” кортикального контроля, что приводит к относительному усилению альтернативных нисходящих систем, прежде всего ретикулоспинальных и вестибулоспинальных путей. Эти системы обеспечивают более грубый, синергичный характер моторных ответов, склонный к сопроактивации мышц и формированию устойчивых патологических паттернов (Петров К.Б., 2025; Ключков А.С., 2022). Данный механизм часто рассматривается как компенсаторный (поддержание базовой двигательной активности), однако при длительном существовании он может способствовать закреплению патологических синергий и усилению спастичности.

На сегментарном уровне спастичность связывают с гиперрефлексией и повышенной возбудимостью α -мотонейронов, снижением пресинаптического торможения Ia-афферентов, нарушением реципрокного торможения антагонистов и дисфункцией интернейрональных контуров. Дополнительный вклад могут вносить персистирующие входящие токи в мотонейронах (PICs), поддерживающие пролонгированную деполяризацию и склонность к самоподдерживающейся активности (Челноков А.А., 2022; Minassian K., 2024). В коннектомном подходе детальная нейрофизиология спинальных механизмов, хотя и помогает объяснить спастичность, сталкивается с ограничениями прямых МРТ-измерений. Со временем первичное поражение нервной системы запускает вторичные изменения

в мышцах и соединительной ткани. Замедление продольного роста мышц относительно костей, уменьшение числа последовательных саркомеров, повышение жёсткости сухожильно-апоневротических структур и фиброз (Кенис В.М., 2022; Syed F., 2025). Эти изменения наращивают сопротивление пассивному движению и сужают амплитуду, замыкая патологический круг: спастичность → ограничение движения → вторичные контрактуры → дальнейшее ухудшение двигательного контроля. При интерпретации реабилитационных исходов и динамики коннектома следует иметь в виду, что нейросетевая перестройка нередко разворачивается на фоне устойчивых мышечно-скелетных ограничений, что отчасти объясняет, почему сопоставимые изменения на МРТ могут сопровождаться разным клиническим ответом.

Отдельной дискуссии заслуживает вопрос, в какой степени спастичность является ведущим механизмом двигательных ограничений при спастической диплегии. Согласно одному подходу, спастичность рассматривается как основной фактор, определяющий патологические синергии и снижение функциональной мобильности, поэтому снижение тонуса интерпретируется как ключевая терапевтическая цель (Красавина Д.А., 2021; Ayoub N. 2021). Однако другие авторы подчёркивают, что клиническая выраженность спастичности не всегда коррелирует с ограничением активности и уровнем ходьбы, а на первый план могут выходить слабость, нарушение селективного моторного контроля и дефицит сенсомоторной координации (Gill P.K., 2023; Graci V., 2024). Для интерпретации эффектов реабилитации этот спор принципиален: улучшение клинических исходов может быть связано не только (и не столько) с изменением тонуса, сколько с перестройкой сетевого контроля движений и повышением эффективности сенсомоторных контуров.

Хотя спастическая диплегия часто описывается как преимущественное поражение нижних конечностей, нейробиологически данная форма ДЦП не сводится исключительно к “слабости пирамидного тракта”. Существенную роль играют нарушения сенсомоторной интеграции и постурального контроля, связанные с вовлечением таламокортикальных путей, ассоциативных трактов и

межрегиональных связей (Graci V., 2024; Jacobs N.P.T., 2025). Таламокортикальные пути обеспечивают корректную обработку проприоцептивных и тактильных сигналов, что необходимо для точной настройки движений и удержания равновесия. Их повреждение снижает точность сенсорной обратной связи, из-за чего возрастает опора на зрительный контроль и страдает адаптация к изменяющимся внешним условиям.

Не менее важна роль комиссуральных и ассоциативных трактов. Нарушение межполушарных связей ограничивает координацию между полушариями и эффективность двустороннего управления движениями, что особенно сказывается на устойчивости позы и согласованности шаговых циклов (Martinie O., 2025). В коннектомном анализе это выражается в снижении структурной связанности сенсомоторных зон обоих полушарий и изменении функциональной синхронизации внутри сенсомоторной сети по данным фМРТ покоя.

Постуральный контроль опирается на сочетание опережающих постуральных реакций и реактивных стратегий (переступание, шаговые реакции), а также на способность перераспределять вес сенсорных вкладов. Когда проводимость и синхронизация в белом веществе нарушены, снижается скорость коррекции ошибок и точность межмышечной координации. Клинически это проявляется нестабильностью, повышенными энерготратами и падением функциональной мобильности (Повереннова И.Е., 2022). Эти соображения проясняют, почему улучшение тонуса само по себе не всегда повышает показатели баланса. Постуральные сети могут оставаться неэффективными из-за структурных дефектов и укоренившихся двигательных стереотипов.

При построении интерпретационной модели данных МР-исследования следует помнить, что структурные и функциональные составляющие коннектома отражают различные грани нейробиологии спастической диплегии. Нарушение миелинизации и микроструктурная дезорганизация белого вещества являются ключевым основанием для ожидаемых изменений структурного коннектома, включая снижение интеграции моторных узлов сети и уменьшение силы связей между кортикальными и подкорковыми регионами. На уровне диффузионных

метрик это может проявляться снижением FA и повышением MD/RD в проекционных путях (кортикоспинальный тракт), таламокортикальных и комиссуральных трактах, а также изменением топологии структурной сети по данным графового анализа (Radwan A., 2023, Martinie O., 2023; Vallinoja J., 2024).

Нейропластическая перестройка, в свою очередь, в большей степени связана с функциональным коннектомом и может проявляться изменениями функциональной связанности в сенсомоторной сети, перестройкой взаимодействий моторной коры с премоторными зонами, дополнительной моторной областью, мозжечком и базальными ганглиями. В ряде работ функциональные изменения рассматриваются как маркеры компенсации и моторного обучения, однако их направление и клиническая “полезность” остаются неоднозначными и требуют сопоставления с клинико-функциональными показателями (Горбунов А.В., 2025). В частности, усиление связности может отражать как повышение эффективности управления движением, так и дезадаптивную перегрузку сети при выполнении задач.

В резидуальном периоде ДЦП структурные параметры белого вещества зачастую демонстрируют относительную стабильность. Тогда как функциональная коннективность отличается более выраженной динамикой и подвержена изменениям под действием терапевтических вмешательств. В связи с этим вероятным исходом реабилитации выступает преимущественная функциональная реорганизация нейросетей (регистрируемая как изменения в показателях фМРТ покоя) на фоне незначительных структурных сдвигов. При достаточной продолжительности и интенсивности воздействия возможно сочетание функциональных и микроструктурных перестроек.

Нейробиологическая основа спастической диплегии складывается из трёх взаимосвязанных вещей. Во-первых, это раннее повреждение или просто незрелость белого вещества, особенно в перивентрикулярных областях. Во-вторых, страдает миелинизация длинных проводящих трактов. И в-третьих, уже вторично запускается нейропластическая перестройка моторных и сенсомоторных сетей. Первые два фактора задают жёсткий структурный

фундамент, отсюда и ограничения движений, и проблемы с избирательным контролем мышц, и неуклюжесть, и трудности с удержанием позы. А вот нейропластичность, наоборот, вносит изменчивость. Именно она объясняет, почему при схожих структурных нарушениях клинические фенотипы такие разные и почему функция может заметно меняться под влиянием реабилитации. Для МР-коннектомики всё это прямое попадание, потому что данные диффузионной МРТ отражают изменения в структурной сети, а фМРТ покоя показывает, как перестраивается функциональная связанность. Если рассматривать все эти процессы вместе, получается та самая научная основа, чтобы потом анализировать коннектомные сдвиги у пациентов до и после лечения и, что важно, связать клиническую картину ДЦП с объективными нейровизуализационными маркерами эффективности.

1.3 Коннектом головного мозга при детском церебральном параличе

В коннектомике мозг представляют как сложную сеть: узлы это корковые и подкорковые зоны (их ещё называют парцеллами), а рёбра - связи между ними. Обычно выделяют два взаимодополняющих уровня: структурный коннектом (это анатомические тракты белого вещества) и функциональный (статистическая согласованность активности разных областей во времени). Для ДЦП такое двустороннее описание, на мой взгляд, особенно ценно. Ведь само первичное повреждение не прогрессирует, но клинический фенотип и функциональные ограничения со временем меняются, и из-за развития ребёнка, и под действием терапии. Значит, мы имеем дело с сочетанием относительно стабильных структурных дефектов и подвижных, динамичных функциональных перестроек (как раз об этом пишут Челпаченко и соавторы, 2020).

Клинически коннектомный подход даёт то, чего не может дать старая очаговая модель. Ведь у большинства детей со спастической диплегией моторные проблемы не замыкаются на одной зоне, это нарушение работы целой сети, куда

входят кортикоспинальные, таламокортикальные, корково-мозжечковые пути и межполушарные связи (недавние работы Lee, 2025, это хорошо показывают). Поэтому коннектомика позволяет не просто искать, где очаг, а понять, как именно нарушена система управления движением. Например, объяснить ту же дискоординацию, потерю селективности, патологические синергии и неустойчивость через свойства самой сети, как это обсуждается у Павленко (2024).

Важно, что структура не равна функции, но структура задаёт границы возможной функции. Структурная сеть формирует «проводниковый каркас», по которому может распространяться информация, а функциональная связанность отражает, какие взаимодействия реально включаются в текущем состоянии и как они перестраиваются при обучении или реабилитации. Это принципиально для ДЦП: при сходном объёме структурного дефицита клинический профиль и исходы терапии могут существенно различаться — вероятно, за счёт различий в сетевой компенсации (Hong Y, 2023).

Структурный коннектом при детском церебральном параличе

Структурный коннектом отражает анатомические связи между регионами мозга и в клинической коннектомике обычно реконструируется по данным диффузионной МРТ и трактографии. В контексте ДЦП структурный коннектом является инструментом оценки того, какие проводящие пути нарушены, насколько выражено снижение их организованности/миелинизации и какие сетевые последствия это создаёт для моторных контуров (Jaatela J., 2023).

Для спастической диплегии наиболее типичным субстратом является поражение белого вещества перивентрикулярной зоны и микроструктурная дисорганизация длинных трактов. На уровне DTI это нередко проявляется снижением FA и повышением MD/RD в проекционных и комиссуральных путях, включая кортикоспинальный тракт, таламокортикальные проекции и мозолистое тело. Сетевой анализ в данном случае даёт возможность увидеть не только то, как меняются отдельные проводящие пути, но и общую архитектуру структурной

сети: насколько она интегрирована, выражена ли её модульная организация и в каком состоянии находятся ключевые узлы и связи между ними (Vuong A; Коптева Ю.П., 2023).

Для оценки моторных ограничений при ДЦП структурный коннектом особенно ценен тем, что он переводит эти ограничения в формальную модель. Когда повреждается кортикоспинальный тракт и сопутствующие ему волокна, более примитивные нисходящие системы начинают доминировать, и движения теряют избирательность. Вовлечение комиссуральных путей сказывается на межполушарном взаимодействии, страдает двусторонняя координация и ослабевает тормозный контроль между полушариями. А если затронуты ассоциативные тракты, это уже влияет на способность планировать движения и интегрировать сенсорную информацию (Погосбекян Э.Л., 2023).

При этом в литературе постоянно встречается одна важная оговорка: трактография не даёт нам прямого изображения аксонов, она строит лишь вероятностные модели их прохождения. Поэтому структурные заключения должны строиться на комплексе метрик (включая DTI/GQI и показатели качества), а также учитывать возрастные нормы и ограничения диффузионных моделей, применяемых у детей (Никогосова А.К., 2022; Кремнева Е.И., 2020). Без такого подхода корректная интерпретация межгрупповых различий и реабилитационной динамики становится затруднительной.

Функциональный коннектом характеризует согласованность активности разных мозговых областей во времени. Наиболее распространённый способ его оценки - фМРТ покоя, при которой анализируются корреляции низкочастотных флуктуаций BOLD-сигнала. В контексте ДЦП функциональная связанность рассматривается как потенциальный маркер сетевой компенсации, дезадаптивной перестройки и нейропластической динамики (Абдулаев Ш.К., 2024).

У пациентов с ДЦП наиболее воспроизводимо описаны изменения в следующих сетях:

Сенсомоторная сеть (SMN). Часто выявляются нарушения внутрисетевой связанности и изменённые взаимодействия SMN с мозжечком, таламусом и

премоторными зонами. Эти сдвиги связывают с нарушением моторного контроля, координации и сенсомоторного «фидбэка» (Kurcz M.J., 2024).

Фронтально-париетальная сеть (FPN/CEN) и салиентная сеть (SN). Их изменения ассоциируют с исполнительными функциями, вниманием, управлением поведением и сложными компонентами моторного планирования, что особенно актуально для задач обучения движению и устойчивости результата реабилитации (Frontczkowski L., 2024; Фокин В.Ф., 2023).

Default Mode Network - сеть пассивного режима работы мозга (DMN). У детей с ДЦП могут отмечаться нарушения внутрисетевой когерентности и изменённые связи сети пассивного режима работы мозга с другими системами, что обсуждается в контексте когнитивных и поведенческих особенностей и общего «сетевого ресурса» мозга (Маркин К.В., 2023; Rogachov A., 2025).

В последних исследованиях мозжечок и таламо-кортикальные цепи рассматриваются как центральные звенья сенсомоторной интеграции. Причём изменения их функциональных связей могут свидетельствовать, как о недостаточности, так и о компенсаторной перестройке (Артеменков А.А., 2025).

Функциональный коннектом выгодно отличается от структурного своей нейропластичностью. Даже когда анатомический субстрат остаётся стабильным, функциональные сети способны перестраиваться под влиянием тренировок и реабилитационных воздействий. Именно это делает фМРТ покоя ценным инструментом для оценки динамической составляющей восстановления (Прошина Е.А., 2024).

Практическая значимость коннектомики при ДЦП состоит в том, чтобы увязать сетевые показатели с функциональными исходами и реакцией на терапию. В литературе можно встретить данные о том, что характеристики структурного коннектома и DTI-показатели проводящих путей действительно связаны с моторными функциями и возможностями ходьбы (по шкалам GMFCS и FMS), а также с равновесием по шкале Берга. Правда, сила и направление этих связей заметно колеблются в зависимости от возраста пациентов, клинического фенотипа и того, какие именно методы анализа применялись (Vuong A., 2023;

Камилова Т.А., 2021).

Если взглянуть на проблему с одной стороны, то напрашивается вывод: структура задаёт жёсткие рамки. Сторонники такого подхода убеждены, что главный лимит для восстановления – это степень первичного повреждения белого вещества и трактов, а все функциональные перестройки – лишь попытка приспособиться к уже сложившемуся скелету связей (Courtney SM, 2024; Jacobs N.P.T., 2025; Martinie O., 2023). Из этой логики вытекает, что в поздней резидуальной стадии DTI-метрики вряд ли сильно изменятся, да и клинические улучшения будут скорее скромными.

Однако существует и прямо противоположная точка зрения: функция и компенсаторные механизмы могут если не перевесить, то по крайней мере существенно скорректировать исходное структурное ограничение. Сторонники этого лагеря утверждают, что даже при схожей анатомической картине возможны совершенно разные траектории развития и разные способы компенсации. Поэтому, по их мнению, функциональный коннектом (с его графовыми параметрами) гораздо лучше отражает реальный реабилитационный потенциал и отклик на терапию, чем просто структурная схема (Sudati I.P., 2024; Qi W., 2025; Khan O.A., 2025).

Отдельный и довольно острый вопрос – как трактовать усиление функциональной связанности. Одни исследователи видят в этом признак полезной пластичности и успешной интеграции (Aswendt M., 2023; Piervincenzi C., 2025). Другие, напротив, считают это сигналом перегрузки и деспециализации: мол, мозг вынужден подключать лишние области только для того, чтобы справиться с простейшими двигательными задачами (Penalba-Sánchez L., 2023).

Из этого, на мой взгляд, следует одно важное практическое соображение: изменения в фМРТ покоя нельзя рассматривать изолированно, их обязательно надо сверять с клинической динамикой и показателями сетевой топологии (интеграция, сегрегация, глобальная эффективность, модульность). Именно поэтому мультимодальный подход – одновременное использование DTI и фМРТ покоя – выглядит методологически оправданным. Он позволяет различить, где мы

упираемся в «структурный потолок», а где ещё есть пространство для «функционального манёвра», который в итоге и определяет, насколько разными могут быть результаты реабилитации.

В целом же коннектомика даёт нам теоретически и клинически осмысленную модель для понимания ДЦП как нарушения именно структурно-функциональной связанности. Но при этом нужно всегда помнить: корректность любых выводов сильно зависит от того, как именно мы измеряем коннектом, особенно в детской популяции. Здесь свою роль играют и артефакты движений, и выбор схемы парцелляции, и модель диффузии, и принципы графового анализа – всё это может заметно повлиять на конечные результаты. Поэтому далее рассматриваются МР-методы оценки коннектома при ДЦП, их возможности и источники вариативности результатов.

1.4 Нейровизуализационные методы оценки коннектома при детском церебральном параличе: возможности и ограничения

Мультимодальная МРТ рассматривается как ведущий неинвазивный инструмент изучения структурного и функционального коннектома головного мозга *in vivo*, поскольку в рамках одного диагностического подхода позволяет оценить морфологию мозга, микроструктурные характеристики белого вещества и крупномасштабную функциональную организацию сетей (Буккиева Т.А., Поспелова М.Л., 2022; Cabalo DG 2025).

В отечественной литературе значительный вклад в развитие методов магнитно-резонансной нейровизуализации внесли работы А.В. Позднякова, посвящённые применению современных МР-технологий для анализа структурно-функциональной организации головного мозга. В частности, в ряде исследований показано, что МРТ и её количественные модификации позволяют выявлять не только морфологические изменения, но и особенности метаболических и функциональных процессов в мозге, что существенно расширяет возможности

диагностики заболеваний ЦНС (Поздняков А.В.).

Эта методология приобретает особую значимость, так как клинический фенотип заболевания формируется не только локальным повреждением отдельных зон мозга, но и нарушением межрегиональных связей, их созревания и перестройки в ходе развития. На мой взгляд, именно поэтому коннектомный анализ сегодня всё чаще рассматривают как более содержательную модель для описания ДЦП, чем традиционный очаговый подход. Последний, по сути, лишь констатирует сам факт поражения, но почти ничего не говорит о том, почему функциональные исходы у разных пациентов так сильно разнятся и почему реабилитация даёт неодинаковый эффект. Что касается современных МР-методов, то тут обычно выделяют три основных направления: диффузионную МРТ (включая классическую DTI и её более сложные варианты) для оценки структурных трактов, функциональную МРТ покоя, которая показывает функциональные связи и их перестройки, и графовый анализ - он позволяет описать топологию мозговых сетей и количественно оценить, как разные области взаимодействуют между собой. По сути, эти три инструмента и составляют основу коннектомного подхода, давая возможность увидеть не просто факт повреждения, а всю сложную картину сетевых взаимоотношений.

Однако у каждого из этих подходов есть не только достоинства, но и вполне конкретные ограничения, которые и составляют суть активных методологических споров в литературе.

Диффузионно-взвешенная МРТ (DWI) даёт возможность количественно судить о микроструктуре белого вещества, фиксируя направленность диффузии воды вдоль упорядоченных миелинизированных волокон. Наиболее распространённой остаётся тензорная модель (DTI), где диффузия описывается тензором, что позволяет рассчитывать базовые количественные параметры.

В клинической практике при ДЦП эти параметры служат наиболее доступными количественными показателями, которые позволяют перейти от общих характеристик белого вещества к анализу конкретных проводящих систем. Если говорить о спастических формах, включая спастическую диплегию, наиболее устойчиво регистрируемые микроструктурные изменения

обнаруживаются в проекционных и комиссуральных путях - прежде всего в кортикоспинальном тракте (CST), задней ножке внутренней капсулы (PLIC), таламической лучистости и мозолистом теле. Именно эти структуры сегодня рассматривают как анатомический субстрат нарушений моторного контроля и сенсомоторной интеграции, и изменение их DTI-показателей статистически связано с выраженностью двигательных ограничений и функциональными исходами (Wang M., 2025).

Но и в литературе нет единой трактовки того, что именно означают сдвиги DTI-параметров. Одна группа авторов видит в FA/MD в CST и PLIC практические структурные маркёры, очерчивающие границы моторного восстановления. Чем глубже микроструктурный дефицит проводящих путей, тем скромнее прогноз в отношении высокой мобильности и избирательного моторного контроля. Такую позицию подкрепляют работы, где DTI-метрики устойчиво коррелируют с уровнем GMFCS, показателями селективного контроля движений и функциональными тестами ходьбы (Yuan W., 2024; Jacobs N.P.T., 2025).

Другие исследователи занимают более сдержанную позицию, указывая на биофизическую неспецифичность DTI-метрик. Снижение FA и увеличение RD могут быть вызваны не только демиелинизацией, но и изменением плотности волокон, их геометрии, частичным объёмным эффектом, отёком, незрелостью белого вещества или даже артефактами движения. В такой логике DTI оказывается высокочувствительным, но достаточно неоднозначным инструментом, который требует осторожных причинно-следственных выводов и обязательной сверки с клиническими шкалами (Гизатуллин Р.Р., 2023; Ходоровская А.М., Ефимцев А.Ю., 2024).

Ещё один предмет дискуссий - трактография. С одной стороны, она реконструирует ход трактов и позволяет построить структурный коннектом в виде матрицы связей (узлы соответствуют областям, рёбра реконструированным путям), что приобретает особую ценность при изучении сетевой организации мозга при ДЦП.

С другой стороны, при атипичном развитии белого вещества и наличии

диффузных повреждений стандартные алгоритмы трактографии могут давать как ложноположительные соединения, так и “обрыв” реконструкции в зонах сниженной FA. Поэтому одни авторы рассматривают трактографию как метод, существенно расширяющий возможности количественного анализа, тогда как другие подчёркивают необходимость строгих протоколов контроля качества (QC), корректной коррекции артефактов и, по возможности, применения расширенных моделей диффузии (Шубина К.М. и соавт., 2025; Kim M.E, 2025).

Также подчеркивается проблема трактографии: при ДЦП из-за атипичного развития белого вещества стандартные алгоритмы могут давать ложноположительные и ложноотрицательные пути, что требует более строгих протоколов QC и методик, адаптированных под паттерны повреждения.

Поэтому в современных исследованиях применяются HARDI, GQI, CSD, NODDI, которые используются для преодоления ограничения DTI, допускающего лишь одно доминирующее направление диффузии в каждом вокселе и лучше работают в зонах сложной архитектуры и потенциально повышают точность трактографии и интерпретацию микроструктуры.

Для детского мозга и для ДЦП это принципиально важно, поскольку в белом веществе часто присутствуют зоны перекрёста волокон, участки дисорганизации трактов и обширные области диффузного повреждения с локально низкой FA. Ряд исследований показывает, что усложнение моделей способно повышать точность реконструкции волоконных трактов и уточнять интерпретацию микроструктурных изменений. В то же время существует и обоснованная критика. Как подчёркивает Л.А. Добрынина (2023), повышение сложности модели само по себе не гарантирует прироста клинической значимости результатов. Напротив, оно требует жёсткой стандартизации параметров, сопряжено с ростом вычислительных затрат и затрудняет сопоставление данных между разными исследованиями.

Функциональная МРТ покоя используется для оценки функциональной связанности - через анализ временной согласованности низкочастотных BOLD-флуктуаций между отделами мозга (Biswal B.B., 2025; Amemiya S., 2024).

Перспективным этот метод считается в педиатрической практике и при детском церебральном параличе, поскольку не требует активного выполнения заданий и даёт возможность изучать базовую сетевую архитектуру у детей с двигательными ограничениями, неоднородными когнитивными возможностями и разной степенью готовности к сотрудничеству во время обследования (Amemiya S., 2024).

В современных работах фМРТ покоя применяется для анализа сенсомоторной сети, межполушарного взаимодействия, таламо-кортикальных связей, а также сетями пассивного режима работы мозга и фронто-париетальной сети. Это позволяет увязывать особенности связанности не только с моторными нарушениями, но и с когнитивными и поведенческими коморбидными состояниями (Yu H., 2025; Rogachov A., 2025; Vallinoja J., 2024).

В то же время именно фМРТ покоя остаётся одним из наиболее методологически уязвимых инструментов, особенно в детских выборках. Даже незначительные движения головы способны порождать ложные корреляции и приводить к систематическим искажениям при оценке межсетевых связей (Wunderlich S., 2025; Go F., 2025). Поэтому современный стандарт анализа предполагает строгий контроль, регрессию шумовых компонентов (CompCor), использование ICA-методов для удаления артефактов и исключение низкокачественных сегментов данных (Wunderlich S., 2025; Go F., 2025; Golestani A.M., 2024). Даже при соблюдении этих процедур ряд авторов отмечает, что у детей с ДЦП влияние двигательных артефактов может сохраняться, и потому необходима максимальная прозрачность критериев контроля качества (Wunderlich S., 2025; Go F., 2025).

Дополнительные споры вызывает возрастная изменчивость нейрососудистого сопряжения и гемодинамических реакций. BOLD-сигнал, будучи косвенным индикатором нейрональной активности, зависит от сосудистого ответа (Baller E.B., 2022; Yu H., 2025). Некоторые работы подтверждают, что фМРТ покоя при условии корректной поправки на возраст и стандартной предобработки остаётся достаточно надёжным инструментом для

обнаружения сетевых нарушений (Baller E.B., 2028). В то же время ряд авторов обращает внимание, что сосудистые особенности и неравномерное созревание механизмов регуляции мозгового кровотока могут менять BOLD-сигнал сами по себе, безотносительно к нейрональной активности. Это мешает напрямую интерпретировать сдвиги функциональной связанности как простое «ухудшение» или «улучшение» работы сети (Addeh A., 2025).

Особенно непросто решить, что означает изменение связанности в ту или иную сторону и всегда ли усиление связей говорит о лучшем функциональном результате. Одна группа исследователей трактует рост связанности внутри сенсомоторной сети или вовлечение дополнительных узлов как адаптивную компенсаторную перестройку, отражающую нейропластический ответ на обучение и терапию (Sahrizan N.S.A., 2025; Grigoryan K.A., 2025). Другие настроены более скептически: усиление связей, по их мнению, может указывать на размывание специализации сети и функциональную перегрузку, когда для простой двигательной задачи мозгу приходится мобилизовать избыточные области. Такая реорганизация скорее говорит о дезадаптации (Vallinoja J., 2024; Piervincenzi C., 2025; Sato S.D., 2025). Поэтому функциональные показатели фМРТ покоя имеет смысл рассматривать только в связке с клиническими шкалами и параметрами сетевой интеграции/сегрегации.

Графовый анализ даёт возможность уйти от обсуждения отдельных трактов или попарных корреляций и представить мозг как сеть, где узлы — это области (парцеллы), а рёбра — структурные или функциональные связи. Для ДЦП такой ракурс оправдан, потому что клиническая картина обычно связана с распределённым нарушением взаимодействий, а не с изолированным очагом. Чаще всего внимание уделяют глобальной эффективности (интеграция), модульности (сегрегация), показателям центральности (хабы) и локальной эффективности.

Хотя графовые метрики выглядят привлекательно в роли потенциальных биомаркеров, их толкование вызывает серьёзные методологические споры. Одни рассматривают графовый анализ как способ объективно оценить сетевую

дисфункцию при ДЦП: он позволяет сопоставлять архитектуру мозга между группами, выявлять системные закономерности и отслеживать изменения после вмешательств (Zhao C., 2025; de Almeida Marcelino A.L., 2025). Другие подчёркивают сильную зависимость результатов от выбора схемы парцелляции, способа взвешивания рёбер и пороговой обработки матриц. Пока эти процедуры не унифицированы, графовые показатели плохо воспроизводятся в разных исследованиях (Butry L., 2025). Таким образом, графовый анализ расширяет интерпретационные возможности коннектомики, но одновременно требует максимально прозрачного описания всех шагов построения сети и критериев статистических сравнений.

Воспроизводимость коннектомных данных у детей с ДЦП ограничена сочетанием технических и клинических причин. Основные источники разброса — двигательные артефакты (особенно значимые для фМРТ покоя), расхождения в протоколах сканирования (b-факторы, число направлений, продолжительность сессии фМРТ), качество коррекции геометрических искажений, выбор атласа для парцелляции и порогов для построения графа. Клиническая сторона включает гетерогенность повреждений и коморбидность, возрастную динамику и неравномерность созревания сетей, выраженность вторичных ортопедических изменений, а также разнообразие реабилитационных программ и их интенсивность.

Стоит особо отметить, что при ДЦП стандартные трактографические подходы нередко приходится адаптировать из-за нетипичного строения белого вещества и смещения анатомических ориентиров. Это ещё раз говорит о необходимости подробно описывать пайплайн обработки, контролировать качество и обеспечивать сопоставимость методик.

В целом МР-коннектомика при ДЦП балансирует на грани методологических возможностей и ограничений. Диффузионная МРТ по-прежнему наиболее доступна для оценки структурных ограничений, но страдает от неспецифичности метрик и ограничений трактографии. ФМРТ покоя многообещающа как маркер функциональной компенсации, однако её результаты

сильно зависят от двигательных артефактов и тщательности предобработки. Графовый анализ позволяет подняться на сетевой уровень осмысления, но требует стандартизации порогов и схем парцелляции для повышения воспроизводимости.

1.5 Современные методы нейрореабилитации при детском церебральном параличе

Сегодня нейрореабилитацию при ДЦП всё чаще понимают не как «комплекс процедур», а как целенаправленную работу с функциональными системами мозга и тела, ориентированную на освоение новых двигательных стратегий, поддержку нейропластичности и расширение участия ребёнка в повседневной жизни (Novak I., 2025). Центр тяжести смещается: вместо локальной коррекции работы одной мышцы или сустава во главу угла ставят восстановление целостных навыков — ходьбы, равновесия, манипуляций, самообслуживания — и формирование устойчивых функциональных паттернов (Sakzewski L., 2025).

Современные программы реабилитации при ДЦП опираются на принципы нейронауки и моторного научения: многократные повторения, функционально значимые задачи, постепенное усложнение, регулярная обратная связь и высокая «доза» тренировки (Alhumaid M.M., 2025). В отличие от пассивных методов, типичных для прошлых десятилетий, приоритет отдаётся активной работе: ребёнок не просто «подвергается воздействию», а непрерывно решает двигательную задачу — сохраняет позу, переносит вес тела, координирует шаг, стабилизирует корпус, выполняет целенаправленное движение руками (Patel D.R., 2024; Hwang Y., 2025).

Важной особенностью современной стратегии считается мультидисциплинарность: клинический эффект реабилитации при ДЦП зависит не только от физиотерапии, но и от ортопедического сопровождения, коррекции контрактур, профилактики деформаций, логопедической и нейропсихологической поддержки, а также участия семьи и регулярности тренировочной практики вне

лечебного учреждения (Askeland S., 2025).

Поэтому эффективная программа чаще всего является комбинацией методов, а не одной “универсальной процедурой”. При этом индивидуализация принципиальна: у детей с разными вариантами спастичности, уровнем GMFCS и сопутствующими нарушениями один и тот же метод может давать разные результаты.

Отдельно выделяется роль интенсивности: большинство современных концепций сходятся в том, что клинически значимое улучшение связано не только с типом вмешательства, но и с количеством функциональной практики, распределением нагрузки во времени и систематичностью повторения (Shierk A., 2025; Liang K.J., 2025).

В то же время сохраняется дискуссия о том, где находится “оптимальное окно”: одни авторы считают, что повышение интенсивности почти линейно усиливает эффект (Araneda R., 2024) (143), тогда как другие подчёркивают риск перегрузки, утомляемости и снижения качества движений, что может закреплять компенсаторные, но неэффективные паттерны (DeVol C.R., 2025).

В современной реабилитации ДЦП наиболее весомую доказательную базу накопили подходы, опирающиеся на моторное обучение и функционально ориентированную активность. Задачно-направленные тренировки, многократная практика ходьбы, упражнения на равновесие, отработка двигательных паттернов с опорой на внешнюю обратную связь и постепенное усложнение условий (Shierk A., 2025; Schless S.H., 2025). Эти стратегии нацелены не на абстрактное улучшение показателя, а на формирование целостного навыка, что гораздо лучше согласуется с повышением самостоятельности и мобильности ребёнка.

Используются роботизированная механотерапия (ходьбовые тренажёры, экзоскелеты, вертикализаторы), функциональная электростимуляция, биологическая обратная связь (по ЭМГ и кинематике), виртуальная реальность и иммерсивные среды (Cardone D., 2025). Их главное достоинство – возможность наращивать объём повторений и обеспечивать более стабильные условия занятия, снижая разброс в выполнении движений от сессии к сессии.

Именно здесь разворачивается давняя дискуссия, характерная для реабилитологии. С одной стороны, технологические решения (роботы, VR, БОС) позволяют увеличить дозу практики и сделать обратную связь более информативной, а значит, должны потенцировать эффекты моторного обучения (Хуе Z., 2025). С другой звучат предостережения. Сами по себе технологии не гарантируют переноса достигнутых улучшений в повседневную жизнь. Ребёнок может успешно справляться с задачей в условиях аппарата, но хуже переносить навык в спонтанную активность за пределами кабинета (Fang E., 2025). В таком ракурсе технологии выступают лишь как усилители тренинга, которые работают только при включённости в функционально-ориентированную программу и подкреплении реальными бытовыми целями.

Сенсомоторные и проприоцептивные методики занимают в этой полемике особое место. При ДЦП нередко страдает обработка афферентной информации и точность позного контроля (Boyer E., 2024; Cortés-Pérez I., 2025). Часть исследований поддерживает точку зрения, согласно которой усиление проприоцептивных сигналов и перераспределение сенсорных весов улучшают устойчивость и качество движений (Cortés-Pérez I., 2025). Другие специалисты занимают более сдержанную позицию, отмечая, что сенсомоторные вмешательства требуют тщательного подбора и контроля, иначе возникает риск закрепить внешне стабильный, но функционально неэффективный двигательный стереотип (Boyer E., 2024).

В русле сенсомоторной коррекции выделяется направление экзоскостюмов и носимых реабилитационных систем, сочетающих механическую поддержку с усилением афферентации. Костюм «РЕФОРМАТЭКТ» относится именно к этой категории. Рассматривается как средство, потенциально влияющее на качество позы и работу кинематических цепей за счёт управляемой афферентной нагрузки и биомеханической коррекции (Burcheld S.J., 2025). В литературе обсуждается, что подобные устройства способны выполнять роль проводника правильного движения, облегчая формирование более физиологичных паттернов ходьбы и поддержания равновесия. Вместе с тем сохраняется потребность в объективной

оценке их эффективности и в понимании нейробиологических механизмов действия - особенно на уровне мозговых сетей (Emara H.A., 2024).

Современная нейрореабилитация при ДЦП всё чаще осмысливается через призму нейропластичности. Способности нервной системы перестраивать функциональные связи и компенсаторные механизмы под влиянием опыта и тренировки (Vacchini V., 2025). ДЦП представляет собой непрогрессирующее поражение развивающегося мозга, функциональный фенотип остаётся динамичным, и именно эта динамика создаёт терапевтическое окно для вмешательств.

Одна группа исследователей утверждает, что даже в этом периоде возможно улучшение качества движений за счёт перестройки функциональных взаимодействий, перераспределения сетевой нагрузки и формирования более эффективных компенсаций (Elsaeed T.M., 2025; Qi W., 2025). Другие указывают, что повреждение проводящих путей, дефицит миелинизации, нарушение межполушарной координации задают объективный потолок восстановления, и терапия чаще приводит не к радикальному сдвигу функции, а к оптимизации имеющихся резервов и снижению вторичных осложнений (Munns C.F., 2025).

Фармакологическое снижение спастичности (например, ботулинотерапия или, в отдельных случаях, интратекальный баклофен) может создать временной промежуток, в котором ребёнку легче осваивать новые двигательные стереотипы. Носамо по себе уменьшение тонуса не равнозначно улучшению функции, без активного моторного переобучения эффект таких мер часто остаётся ограниченным (Gresits O.Z., 2025). Поэтому наиболее обоснованной выглядит комбинированная стратегия. Сначала создать благоприятные биомеханические и нейрофизиологические условия, а затем интенсивно закреплять функциональные навыки через целенаправленную практику.

Оценка эффективности реабилитации при ДЦП остаётся одной из самых сложных задач. Улучшения могут быть неравномерными, они зависят от мотивации, возраста, клинического фенотипа, тяжести поражения и объёма вмешательства (Dimakopoulos R., 2024). Традиционно для этого используют

валидированные шкалы и функциональные тесты (GMFM, GMFCS, MAS, F.M.S., Berg и др.) (Koziol N.A., 2025). Эти инструменты хорошо отражают общий уровень функционирования, но не лишены ограничений. Они могут быть недостаточно чувствительны к тонким сдвигам в сенсомоторной интеграции, координации или к ранним признакам нейропластической перестройки.

Клинические шкалы остаются золотым стандартом конечных исходов. В конечном счёте важно, что ребёнок реально делает в повседневной жизни. Ходит ли, сохраняет ли равновесие, становится ли более самостоятельным (Christovão I.S., 2025; Karibzhanova D., 2025). В то же время многие авторы подчёркивают, что нейропластические изменения в мозге могут опережать клинически заметный результат. Перестройка связей и сетевых взаимодействий способна происходить раньше, чем она отразится на функциональном статусе (Huang X., 2025). Это создаёт запрос на объективные нейровизуализационные маркеры, способные улавливать изменения на более тонком уровне.

Развитие МР-коннектомики (диффузионная МРТ/трактография и фМРТ покоя) позволило взглянуть на реабилитацию не только как на внешнее улучшение функции, но и как на процесс перестройки структурной и функциональной сетевой организации мозга (Hu J., 2026). В рамках сетевого анализа стало возможным количественно оценивать изменения коннектома с помощью графовых метрик глобальной эффективности, модульности, локальной эффективности, центральности узлов и характеристик межсетевого взаимодействия (Lozano-Bagén T., 2025). Теоретически это даёт шанс получить объективные маркёры нейропластичности, сопоставить их с клиническими шкалами и глубже понять механизмы действия различных терапевтических подходов.

Однако здесь также сохраняется полемика. Оптимистичная позиция заключается в том, что коннектомные показатели могут стать чувствительными биомаркерами динамики и даже помочь прогнозировать ответ на терапию, выделяя группы детей с более высоким потенциалом улучшения (Lee S.W., 2025). Критическая позиция подчёркивает, что коннектомные результаты зависят от протоколов сканирования, движения, выбора парцелляции, порогирования связей

и пайплайна обработки, а значит, без стандартизации и контроля качества они могут быть недостаточно воспроизводимыми между исследованиями (Mullin H.A., 2025). Кроме того, нейровизуализация не должна “подменять” клинику: улучшение графовой метрики само по себе не является гарантией улучшения повседневной активности, если не сопровождается функциональным ростом.

Таким образом, наиболее обоснованным считается интегративный подход, когда клиническая динамика рассматривается совместно с изменениями структурного и функционального коннектома, а коннектомные показатели используются как дополнительный уровень объяснения и объективизации эффекта реабилитации (Khan O.A., 2025).

Детский церебральный паралич представляет собой гетерогенное состояние с непрогрессирующим первичным поражением мозга, но динамичным клиническим фенотипом, который меняется по мере роста ребёнка и формирования вторичных ортопедо-биомеханических нарушений.

Описание пациентов с ДЦП сегодня строится на многоосевом принципе, который объединяет клинический подтип, топографию поражения, функциональный профиль и сопутствующие расстройства в единую характеристику. Такой подход возник закономерно: ни изолированное кодирование по МКБ-10, ни определение уровня по шкале GMFCS порознь не способны охватить все многообразие нарушений, а их отдельное использование существенно ограничивает возможность сопоставления результатов разных исследований между собой.

Спастическая диплегия представляет собой удобную модель для изучения коннектома мозга. В ее основе, как правило, лежит повреждение белого вещества, за которым следуют масштабные перестройки нейронных сетей. Клинические проявления при этой форме ДЦП формируются под влиянием двух факторов: локального структурного дефекта и особенностей распределенных связей между отдаленными областями мозга.

Концепция коннектома (и структурного, и функционального) открывает возможность выйти за рамки традиционного описания изолированных очагов

повреждения. На практике часто оказывается, что у двух детей со сходной картиной поражения мозга двигательные и когнитивные нарушения проявляются совершенно по-разному, да и восстановление идёт каждый раз своим путём. Нейросетевые модели, пожалуй, дают наиболее убедительное объяснение этому феномену. Если говорить об анатомической основе, то тут ключевую роль играет структурный коннектом. Его мы получаем с помощью диффузионно-тензорной визуализации и трактографии. Он показывает, в каком состоянии находятся проводящие пути, межполушарные связи и ассоциативные волокна, то есть задаёт жёсткие рамки для моторного контроля. А вот функциональный коннектом, который строят по данным фМРТ покоя, куда более гибкий: он чутко реагирует на компенсаторные перестройки и пластические сдвиги, в том числе на те, что происходят под влиянием реабилитации.

Но тут есть одна тонкость. Те же самые изменения функциональной связности у разных пациентов могут трактоваться диаметрально противоположно: рост какого-либо показателя в одном случае говорит об улучшении работы сети, а в другом о том, что система работает на пределе, компенсируя дефект. Поэтому любые выводы по данным покоя и графовым метрикам имеют смысл только тогда, когда их сопоставляют с клиническими шкалами вроде GMFCS, FMS или Berg. Без этого интерпретация становится рискованной.

Мультимодальный подход это когда сочетают DTI, фМРТ покоя и графовый анализ. Выглядит очень перспективным, особенно как неинвазивный способ заглянуть в структурно-функциональную организацию мозга живого человека. Однако в детской популяции всё это сталкивается с серьёзными трудностями. Дети шевелятся, протоколы сканирования разнятся от центра к центру, методики обработки данных тоже не унифицированы. Так что без жёсткого контроля качества и стандартизации тут не обойтись.

Вопрос воспроизводимости таких исследований вообще непростой. С одной стороны, влияют чисто технические нюансы: движение, параметры съёмки, способы коррекции искажений, выбор парцелляции и порогов. С другой клиническая неоднородность: разный возраст, сопутствующие нарушения, тяжесть

вторичных изменений, да и объём терапии у всех свой. Всё это сильно размывает картину.

Современная нейрореабилитация при ДЦП всё больше смещается в сторону моторного обучения, сенсомоторной интеграции и опыта, который запускает пластичность. Причём сейчас наибольшие надежды возлагают на комбинированные программы с высокой интенсивностью и участием разных специалистов, где акцент делают не на абстрактные упражнения, а на реальные функциональные навыки.

И всё же оценить, насколько эффективно сработала реабилитация, до сих пор не так просто. Клинические шкалы дают конечную картину какой результат достигнут в итоге. Но они часто запаздывают и могут не заметить ранних перестроек на уровне нейросетей, которые происходят задолго до того, как появятся внешние улучшения. Это, пожалуй, одна из главных методологических головных болей в нашей области.

В связи с этим интеграция клинических данных и МР-коннектомных метрик представляется наиболее обоснованным подходом для объективизации эффекта терапии.

Таким образом, формируется теоретическое и методологическое основание настоящего исследования: коннектомика рассматривается как инструмент выявления и количественной оценки нейросетевых нарушений при ДЦП и потенциальный маркер динамики до/после реабилитационного вмешательства, при условии строгой стандартизации протокола и клинико-нейровизуализационного сопоставления.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Дизайн исследования и характеристика пациентов

Диагноз ДЦП по типу спастической диплегии устанавливался на основании действующих клинических рекомендаций Союза педиатров России (редакция 2016 г., с учётом последующих обновлений и современных научных данных), в сочетании с критериями Международной классификации болезней 10-го пересмотра (МКБ-10, рубрика G80).

Исследование выполнено в соответствии с национальными и международными этическими нормами, одобрено локальным этическим комитетом ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России (протокол № 10-23, 2 октября 2023 г.).

До включения в протокол родители детей подписывали форму информированного добровольного согласия, а также были проинформированы о гарантиях сохранения конфиденциальности полученных данных.

Работа выполнялась в соответствии с «Правилами клинической практики в Российской Федерации», утверждёнными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 266, и Декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» (Хельсинки, с поправками 2000 г.).

Исследование выполнено как проспективное продольное когортное исследование по типу «до/после» с группой сравнения.

Формирование основной группы и группы сравнения осуществлялось методом последовательной выборки среди пациентов, проходивших лечение в ЦМТР.

Критерии включения:

- клинически подтверждённый диагноз ДЦП, спастическая диплегия;
- возраст 4–15 лет;

- уровень двигательных нарушений II–III по GMFCS;
- поздняя резидуальная стадия заболевания;
- стабильное клиническое состояние не менее 3 месяцев до включения;
- возможность участия в ежедневных занятиях в течение всего курса;
- письменное информированное согласие родителей/законных представителей.

Критерии исключения:

- неконтролируемая эпилепсия (частые приступы/эпилептический статус за последние 6 месяцев);
- выраженные когнитивные/поведенческие нарушения, препятствующие обследованиям и занятиям;
- тяжёлая соматическая патология в стадии декомпенсации;
- выраженные контрактуры, исключающие выполнение комплекса упражнений;
- противопоказания к МРТ (имплантируемые электронные устройства, несовместимые металлические конструкции и др.);
- отказ от участия.

В исследование были включены 178 детей с ДЦП (спастическая диплегия) в возрасте 4–15 лет (средний возраст 8 ± 3 года).

По шкале Gross Motor Function Classification System (GMFCS) у большинства участников ($\approx 70\%$) отмечался II уровень двигательного дефицита, у 30 % пациентов – III уровень.

Все дети находились в поздней резидуальной стадии заболевания, имели стабильный неврологический статус и могли выполнять предложенные задания при проведении лечения.

Общая выборка была разделена на две группы, сопоставимые по возрасту, полу и распределению уровней GMFCS ($p > 0,05$).

Распределение пациентов с ДЦП по уровню GMFCS (II, III, IV) и по функциональному уровню ходьбы (FMS) (Рисунок 1), было сопоставимо в основной и группе сравнения ($p > 0,05$).

Таблица 1 – Распределение детей по полу в основной группе и группе сравнения

Показатель	Основная группа (n=95)	Группа сравнения (n=83)	Всего (n=178)
Мальчики	38 (40,0%)	37 (44,58%)	75
Девочки	57 (60,0%)	46 (55,42%)	103
Итого	95 (53,4%)	83 (46,6%)	178

Как видно из таблицы 1, распределение детей по группам, представлено следующим образом.

- Основная группа – дети с ДЦП, получавшие стандартное лечение в сочетании с технологией проприоцептивной коррекции посредством костюма «Reforma-ТЭКТ» до и после проведения курса лечения: 95 детей (мальчиков – 38, девочек – 57).
- Группа сравнения – дети с ДЦП, проходившие только стандартное комплексное лечение без использования технологии проприоцептивной коррекции посредством костюма «Reforma-ТЭКТ» – 83 (мальчиков – 37, девочек – 46).

Группы были сопоставимы по основным демографическим и клинко-функциональным характеристикам ($p > 0,05$).

Сканирование и клинко-функциональная оценка пациентов проводились в двух временных точках:

T0 – базовая точка (до начала курса лечения).

На данном этапе фиксировались исходные показатели моторных функций, мышечного тонуса, пострурального контроля, а также параметры нейровизуализации, отражающие резидуальное состояние центральной нервной системы.

T1 – вторая временная точка (через 1 месяц после завершения курса лечения).

Данный интервал был выбран для оценки устойчивых нейропластических перестроек, формирующихся в период закрепления моторного обучения.

Для более точного анализа мы дополнительно разделили пациентов на подгруппы: учитывали возраст, выраженность двигательных расстройств, уровень функциональной подвижности, гестационный срок при рождении и ведущий тип морфологического дефекта мозга. Это позволило нам проверить,

насколько основная группа и группа сравнения сопоставимы между собой, и исключить вероятность того, что исходные клинико-анатомические различия повлияют на конечные результаты. На рисунках 1–4 показано, как именно распределились участники по возрастным категориям, шкалам GMFCS, показателям FMS, срокам гестации и характеру поражения. При сравнении этих параметров между группами мы не получили статистически значимых расхождений ($p > 0,05$). Это говорит о том, что на старте исследования обе выборки были вполне сопоставимыми.

Таким образом, дальнейший анализ клинических и нейровизуализационных показателей проводился в условиях сопоставимых исходных характеристик групп, что повышает корректность оценки эффекта лечения с применением костюма «Reforma-ТЭКТ».



Рисунок 1 - Распределение пациентов основной группы и группы сравнения по уровням GMFCS и показателям постурального контроля (SATCo) до начала лечения

Как видно из данных, представленных на рисунке 1, статистически значимых различий между основной группой и группой сравнения по уровням GMFCS и показателям постурального контроля SATCo до начала лечения не выявлено

($p > 0,05$), что свидетельствует об их исходной сопоставимости.

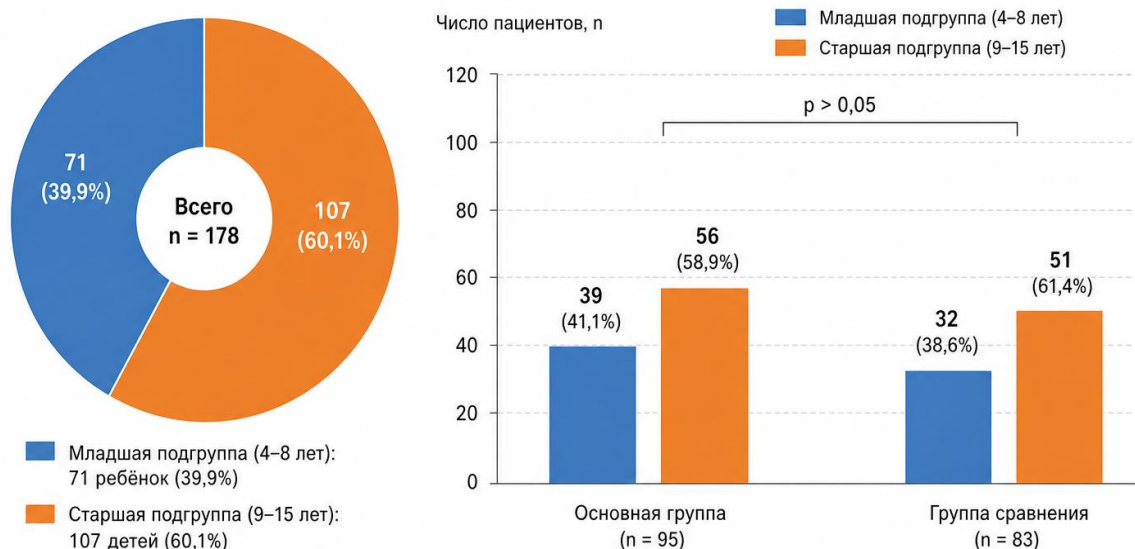


Рисунок 2 - Распределение пациентов по возрастным группам

Как представлено на рисунке 2, распределение пациентов по возрастным подгруппам в основной группе и группе сравнения было сопоставимым, статически значимых различий между группами не выявлено ($p > 0,05$), что исключало существенное влияние возрастного фактора на результаты исследования.

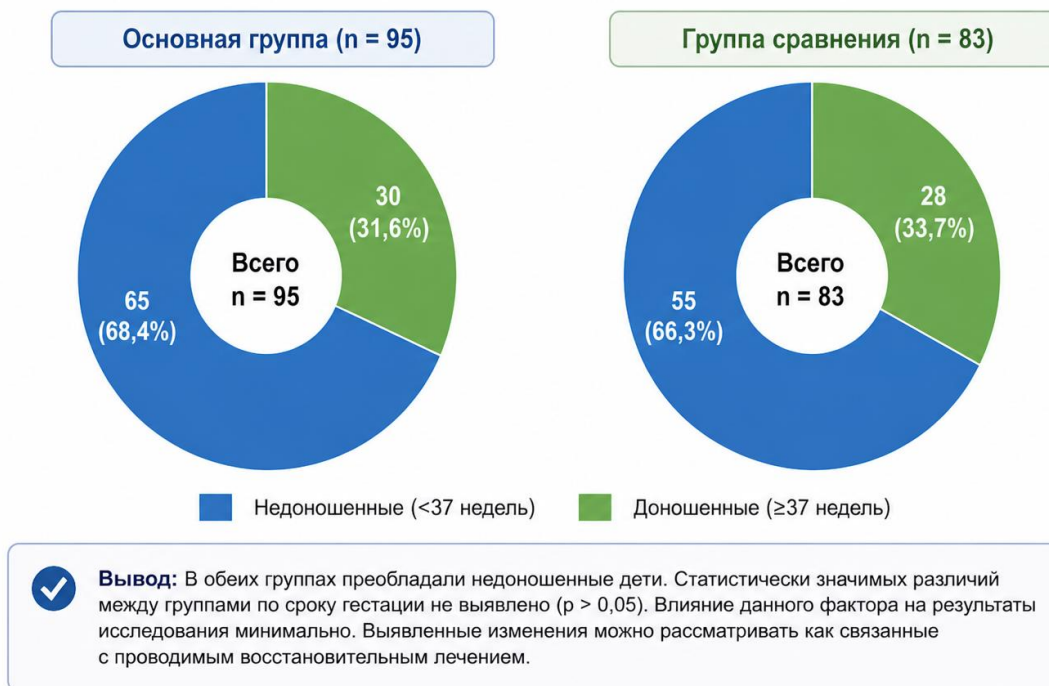


Рисунок 3 - Распределение пациентов по сроку гестации в основной группе и группе сравнения

Как показано на рисунке 3, статистически значимых различий между группами по сроку гестации не выявлено ($p>0,05$), что свидетельствует об их сопоставимости по данному показателю и позволяет минимизировать влияние перинатальных факторов на результаты исследования.



Рисунок 4 - Характера распределения детей по степени перинатального поражения головного мозга в основной группе и группе сравнения

Как видно на рисунке 4, характер и степень перинатального поражения головного мозга в основной группе и группе сравнения были сопоставимы ($p>0,05$), что подтверждает однородность исследуемой выборки по основному морфологическому субстрату заболевания.

По данным ЭЭГ грубых нарушений биоэлектрической активности и эпилептиформных паттернов, способных оказать влияние на результаты функциональной МРТ покоя, не выявлено, что позволило включить всех обследованных пациентов в дальнейший анализ.

2.2 Клинико-диагностический алгоритм обследования пациентов

Диагностический алгоритм исследования был построен по принципу

мультимодальной оценки, объединяющей клинические, функциональные и нейровизуализационные методы, что позволило комплексно охарактеризовать состояние двигательных функций и структурно-функциональной организации головного мозга у пациентов с ДЦП в поздней резидуальной стадии.

Для каждого пациента диагностическая программа включала:

- клинико-неврологическое обследование;
- регистрацию электроэнцефалограммы (ЭЭГ);
- МРТ головного мозга с применением структурных, диффузионных и функциональных протоколов;
- стандартизированную клинико-функциональную оценку моторных и постуральных функций.

Такой алгоритм позволил сопоставить клиническую и неврологическую динамику с изменениями параметров структурного и функционального коннектома, а также повысить объективность оценки эффективности лечения.

Электроэнцефалографическое исследование выполнялось всем пациентам до проведения функциональной МРТ покоя и использовалось в качестве дополнительного нейрофизиологического этапа контроля. Исследование проводилось с использованием цифрового многоканального электроэнцефалографа «Нейрон-Спектр-4/ВПМ» (ООО «Нейрософт», Россия). Проводилась стандартная рутинная ЭЭГ в состоянии бодрствования с регистрацией фоновой биоэлектрической активности головного мозга и оценкой наличия пароксизмальной, в том числе эпилептиформной, активности. При отсутствии противопоказаний выполнялись функциональные пробы, включая ритмическую фотостимуляцию и гипервентиляцию. Результаты ЭЭГ учитывались при отборе пациентов, поскольку наличие клинически значимой эпилептиформной активности могло оказывать влияние на функциональное состояние церебральных сетей и интерпретацию данных функциональной МРТ покоя. У пациентов, включённых в исследование, клинически значимой эпилептиформной активности выявлено не было.

Клинико-неврологическое обследование

В каждую из двух временных точек выполнялась стандартизированная клинико-функциональная оценка с использованием валидированных шкал и инструментальных методов.

Оценка двигательных функций проводилась с использованием системы классификации крупных моторных функций (GMFCS), позволяющей характеризовать уровень двигательных возможностей ребёнка и степень ограничения самостоятельного передвижения.

Оценка постурального контроля. Контроль туловища оценивался с использованием шкалы сегментарной оценки контроля туловища Segmental Assessment of Trunk Control (SATCo), обеспечивающей поуровневый анализ постуральной стабильности в статических, активных и реактивных условиях. Применение SATCo было принципиально важным ввиду ведущей роли постурального контроля в формировании эффективных моторных паттернов и его тесной связи с активацией сенсомоторной и фронто-париетальной сетей.

Оценка функции верхних конечностей. При наличии клинических показаний выполнялась оценка функции кисти с использованием классификационной системы оценки мануальных возможностей Manual Ability Classification System (MACS), позволяющей классифицировать уровень использования рук в повседневной деятельности. Данный параметр использовался для дополнительного анализа межполушарной и фронто-сенсомоторной функциональной интеграции.

Инструментальная гониометрия. Объективизация объёма движений в основных суставах нижних конечностей осуществлялась методом инструментальной гониометрии. Измерялись активные и пассивные амплитуды движений в тазобедренных, коленных и голеностопных суставах в соответствии со стандартизированными ортопедическими протоколами. Полученные данные использовались для оценки биомеханического эффекта лечения и его возможной связи с изменениями микроструктуры моторных проводящих путей.

Дополнительно оценивались мышечный тонус (Ashworth Scale), способность удержания позы сидя (Hare/Hallet), и коммуникативный уровень (CFCS).

Комплексный подход позволил оценить различные аспекты двигательного функционирования и сопоставить клиническую динамику с нейровизуализационными изменениями

Интеграция клинических и нейровизуализационных данных. Клинико-функциональные показатели, полученные в каждой временной точке, сопоставлялись с параметрами функциональной и структурной коннективности головного мозга. Анализ проводился как по абсолютным значениям, так и по величинам изменения.

Таким образом, диагностический алгоритм исследования обеспечивал многоуровневую оценку состояния пациентов – от клинических проявлений до изменений коннектомной организации мозга, что соответствует современным требованиям доказательного лечения и позволяет рассматривать выявленные нейровизуализационные параметры в качестве объективных биомаркеров эффективности лечения.

2.3 Методики комплексной магнитно-резонансной томографии головного мозга

Перед проведением исследования у всех пациентов в обязательном порядке исключались противопоказания к МРТ, включая наличие кардиостимуляторов, нейростимуляторов, ферромагнитных клипс и имплантов, инсулиновых помп, выраженной клаустрофобии, а также беременности в I триместре. Дополнительно уточнялось наличие ортодонтических конструкций, фиксированных металлических протезов и татуировок с возможным содержанием металлических пигментов. Всем пациентам проводился инструктаж, включающий разъяснение хода исследования, необходимости сохранения неподвижности и следования голосовым инструкциям оператора.

За 2-3 часа до исследования пациентам, при отсутствии медицинских противопоказаний, рекомендовалось воздерживаться от приёма кофеина и

седативных препаратов с целью минимизации их возможного влияния на параметры BOLD-сигнала при функциональной МРТ.

Магнитно-резонансную томографию выполняли на магнитно-резонансном томографе MAGNETOM Espree с силой индукции магнитного поля 1,5 Тл (Siemens, Германия) с использованием многоканальной головной катушки. Исследование проводили в положении пациента лёжа на спине. С целью минимизации двигательных артефактов осуществлялась фиксация головы с использованием специализированных наушников и упоров, при необходимости дополняемая мягкими фиксирующими средствами (поролоновые вкладыши, вакуумная подушка, ремни-фиксаторы). Во время сканирования в помещении находился один из родителей, что способствовало снижению тревожности ребёнка и повышению качества исследования. Седация и наркоз в ходе исследования не применялись.

Контроль качества выполняли непосредственно во время исследования: каждую серию нативных изображений оценивали на наличие двигательных артефактов; при их выявлении соответствующую последовательность повторяли. В случаях, когда ребёнок не мог сохранять неподвижность на протяжении сканирования, пациента исключали из исследования.

Протокол МР-исследования был стандартизирован с целью обеспечения корректного динамического сравнения данных, построения структурного и функционального коннектома, а также упрощения этапов предобработки и контроля качества изображений.

В рамках исследования применяли два варианта нейровизуализационного протокола, различающихся по объёму получаемых данных: расширенный (T0) и сокращённый (T1), используемые в разные временные точки исследования.

Расширенный нейровизуализационный протокол (T0). Расширенный нейровизуализационный протокол применяли в первой временной точке исследования (T0), до начала курса лечения, с целью формирования исходных характеристик структурной и функциональной организации головного мозга. Он включал три ключевых блока: структурную, диффузионную и функциональную магнитно-резонансную томографию. Состав и основные характеристики протокола

представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расширенный нейровизуализационный протокол (T0)

Блок исследования	Метод	Основные параметры
Структурная МРТ	3D T1-MPRAGE	Высокое пространственное разрешение, анатомическая база ~5 мин
	2D T2-BI	Оценка морфологии вещества мозга ~2 мин
	2D T2-FLAIR (TIRM)	Выявление очаговых изменений белого вещества ~3 мин
Диффузионная МРТ	DWI	36 направлений диффузии, b-value 1000 с/мм ² ~3–4 мин
Функциональная МРТ покоя	BOLD-EPI	TR 3000 мс, длительность ~6 минут

Расширенный протокол обеспечивал комплексную оценку морфологических, микроструктурных и функциональных характеристик головного мозга и использовался для формирования исходных параметров структурной и функциональной связности.

Расширенный протокол адаптировали под детей с учетом временных ограничений, при этом диагностическое качество осталось неизменным.

Мы выделили для протокола три основные цели. Первая исключить грубые структурные аномалии и пороки развития мозга. Вторая получить МРТ-изображения высокого разрешения, чтобы впоследствии совместить их с функциональными снимками. И третья построить исходные варианты структурного и функционального коннектомов, которые послужат точкой отсчёта. Вся процедура вместе с укладкой пациента укладывалась примерно в час.

На втором этапе наблюдения (этот визит мы обозначили как T1), который проводился через 4–5 недель после окончания терапии, мы использовали укороченный нейровизуализационный протокол. В него включили только те режимы сканирования, которые позволяют отследить динамику коннектома и при этом дают возможность надёжно сопоставить новые данные с первоначальными. Полный перечень последовательностей и параметров приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Сокращённый нейровизуализационный протокол (T1)

Блок исследования	Метод	Основные параметры
Структурная МРТ	3D T1-MPRAGE	Опорная анатомия для ко-регистрации и нормализации ~ 5 мин
Диффузионная МРТ	DWI	36 направлений диффузии, b-value 1000 с/мм ² ~3–4 мин
Функциональная МРТ покоя	BOLD-EPI	TR 3000 мс, длительность ~6 минут

В стандартный протокол контрольных обследований мы не включали последовательности T2 и FLAIR, их подключали только по конкретным клиническим поводам. Например, если пациент начинал предъявлять новые жалобы, которых раньше не было. Или же когда возникала необходимость более детально разобраться в структурных изменениях, либо перепроверить спорные находки, замеченные ещё на первом исследовании. Таблица 4 содержит распределение протоколов по временным точкам наблюдения. Как в основной группе, так и в группе сравнения использовалась единая схема обследования: на этапе T0 выполнялось расширенное МР-исследование, на этапе T1 – сокращённое. Такой подход обеспечивал сопоставимость данных при анализе динамики. Средняя суммарная продолжительность одного обследования составляла около 60 минут с учётом времени укладки пациента, выполнения полного набора импульсных последовательностей, межсерийных интервалов, служебных серий (локалайзеров, картирования поля), а также возможных повторных сканирований, обусловленных двигательными артефактами.

Таблица 4 – Распределение нейровизуализационных протоколов

Этап	Временная точка	Тип МР-исследования	Цель
T0	до курса	T1, T2, FLAIR, DWI, фМРТ покоя	Исходная структурная, диффузионная и функциональная характеристика
T1	после	T1, DWI, фМРТ покоя	Оценка эффектов вмешательства

Детальные параметры и состав отдельных импульсных последовательностей, входящих в каждый блок исследования, приведены в соответствующих таблицах ниже.

Все структурные изображения получали в стандартизированном режиме с

фиксированными параметрами сканирования, что обеспечивало сопоставимость данных между пациентами и различными временными точками исследования. Для повышения воспроизводимости аксиальных серий T2-взвешенных изображений (ВИ) и T2-FLAIR использовали идентичные геометрические параметры сканирования: поле обзора (FOV) 230 мм, матрицу 320×320, толщину среза 4 мм и межсрезовой интервал 1,5 мм и согласованного размера вокселя. При повторных сканированиях мы каждый раз заново выставляли ориентацию срезов и центрирование, ориентируясь на одну и ту же анатомическую линию — она проходит через нижнюю часть валика и область колена мозолистого тела. Такой ориентир позволял нам сохранять единое положение головы при динамических наблюдениях. Основные параметры структурных импульсных последовательностей приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры структурных МР-последовательностей

Параметр	T2-ВИ (аксиально)	FLAIR (аксиально)	T2-ВИ (коронально)	T1-ВИ (сагиттально)	3D T1- MPRAGE
Время исследования	2:02	3:04	1:27	1:12	5:03
Размер вокселя	0,7×0,7×5,0 мм	0,7×0,7×5,0 мм	0,7×0,7×3,5 мм	1,0×1,0×1,2 мм	1,0×1,0×1,2 мм
FOV	230 мм	230 мм	220 мм	256 мм	256 мм
Матрица	320×320	320×320	640×640	512×512	256×232
Количество срезов	27	27	35	27	172
Толщина среза	4 мм	4 мм	3,5 мм	4 мм	1 мм
Интервал	1,5 мм	1,5 мм	—	—	0 мм
TR	4000 мс	7000 мс	2300 мс	280 мс	2300 мс
TE	113 мс	93 мс	98 мс	2,46 мс	2,83 мс

В качестве ключевой анатомической последовательности мы выбрали T1-взвешенное 3D-изображение в режиме MPRAGE. Оно даёт высокое пространственное разрешение (объём вокселя около 1,1 мм³) и, что важно, открывает возможность для точного постпроцессинга с последующей трёхмерной реконструкцией структур головного мозга. Ещё одно достоинство этой последовательности — чёткий контраст между серым и белым веществом: различие интенсивности сигнала достигает примерно 1,7 раза, благодаря чему

лучше видны тонкие кортикальные аномалии, в том числе очаги гетеротопии и признаки нарушенной дифференцировки коры.

Полученные T1-MPRAGE-данные мы использовали двояко: для визуальной оценки и для количественного анализа. При визуальном осмотре мы проверяли наличие грубых пороков развития, объёмных образований, последствий ишемии или травмы, а также выраженной атрофии коры. Дополнительно мы фиксировали изменения, которые могли бы ограничить проведение трактографии, — скажем, значительные дефекты или разрывы проводящих путей.

На этапе постпроцессинга T1-изображения послужили основой для создания индивидуальных анатомических масок серого и белого вещества. Эти маски в дальнейшем применялись для регрессии физиологических и нефизиологических шумов при анализе фМРТ в состоянии покоя. Кроме того, T1-данные выступали в роли анатомического референса при ко-регистрации и нормализации диффузионных и функциональных изображений в стандартное пространство MNI.

Аксиальные серии T2-ВИ мы использовали на первом этапе, чтобы оценить общее состояние мозгового вещества — выявить грубые структурные отклонения, объёмные образования и аномалии развития. Для более детального поиска очаговых изменений белого вещества (глиоз, постишемические зоны, участки лейкомаляции или лейкоареоза, а также демиелинизирующие процессы) мы привлекали последовательности T2-FLAIR. Они помогали уточнить структурную картину при анализе данных диффузионной МРТ.

Дополнительная анатомическая информация уточнялась при использовании T2-ВИ в корональной плоскости и T1-ВИ в сагиттальной плоскости.

Выраженная структурная патология, способная существенно исказить результаты трактографии или анализа функциональной коннективности, рассматривалась как ограничивающий фактор при включении данных в последующий анализ.

Диффузионно-взвешенную МРТ применяли для оценки микроструктурной целостности белого вещества и анализа проводящих путей головного мозга.

Исследование выполняли с использованием импульсной последовательности EPI с диффузионным кодированием по 36 направлениям при значении b-фактора 1000 с/мм². Параметры диффузионной МРТ представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры диффузионной МРТ

Параметр	Значение
Тип последовательности	Spin-echo EPI с диффузионным кодированием
Плоскость сканирования	Аксиальная
Время исследования	3:42
Размер вокселя	1,8×1,8×4,5 мм
FOV	230 мм
Матрица	128×128
Количество срезов	30
Толщина среза	4,5 мм
Промежуток между срезами	0 (без межсрезового интервала)
TR	4000 мс
TE	92 мс
Направления диффузии	36
b-value	1000 с/мм ²

Полученные данные использовались для последующего количественного анализа параметров диффузии, включая фракционную анизотропию и среднюю диффузивность, а также для реконструкции проводящих путей.

Функциональную МРТ выполняли в состоянии покоя с использованием T2*-взвешенной последовательности BOLD-EPI в аксиальной плоскости. Пациентам давалась стандартная инструкция сохранять неподвижность, не выполнять целенаправленных мыслительных задач и не засыпать во время исследования. BOLD-последовательность основана на регистрации изменений сигнала, обусловленных различиями в содержании оксигенированного и дезоксигенированного гемоглобина, что позволяет косвенно оценивать нейрональную активность. С учётом высокой чувствительности EPI-последовательностей к неоднородностям магнитного поля дополнительно выполняли градиентно-эховую последовательность GRE Field Mapping. Она использовалась для построения карты неоднородностей магнитного поля с последующей коррекцией геометрических искажений на BOLD-изображениях. Для обеспечения корректной коррекции геометрические параметры съёмки

(ориентация и положение срезов) в данной последовательности полностью соответствовали параметрам BOLD-серии.

Параметры функциональных последовательностей приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры функциональной МРТ

Параметр	BOLD-EPI	GRE Field Mapping
Тип последовательности	T2*-взвешенная gradient echo EPI	Gradient echo
Плоскость сканирования	Аксиальная (параллельно AC–PC)	Аксиальная
Время исследования	6:08	0:54
Размер вокселя	$3,0 \times 3,0 \times 4,5$ мм	$3,0 \times 3,0 \times 4,5$ мм
Поле обзора (FOV)	192 мм	192 мм
Матрица	64×64	64×64
Количество срезов	29	29
Толщина среза	4 мм	4 мм
Промежуток между срезами	0 мм	0 мм
Время повторения (TR)	3000 мс	400 мс
Время эха (TE)	30 мс	4,92 мс
Flip angle	90°	—
Число томов (динамик)	~120	—

Таким образом, протокол комплексной МРТ обеспечивал получение структурных, функциональных и диффузионных данных, необходимых для последующей оценки морфологического состояния головного мозга, функциональной связности сетей покоя и микроструктурных характеристик белого вещества. Дальнейшая обработка данных выполнялась с использованием специализированного программного обеспечения и включала стандартизированные этапы предобработки, контроля качества, нормализации и количественного анализа.

2.4 Обработка исходных данных и программное обеспечение

Мы выполнили постпроцессинговую обработку данных мультимодальной МРТ в специализированном ПО для нейровизуализационного анализа. Работа начиналась с конвертации исходных DICOM-файлов в формат NIfTI. Это обязательный этап, без которого невозможно использовать большинство

инструментов для обработки функциональных и диффузионных последовательностей. Формат NIfTI оказался удобен ещё и тем, что позволяет хранить всю импульсную последовательность в одном файле (сразу все срезы или временные объёмы), что существенно упрощает передачу данных и воспроизводимость расчётов. В процессе конвертации мы строго контролировали сохранность метаданных сканирования: геометрию, ориентацию, параметры серии и пространственные характеристики, всё это критично для дальнейшего анализа. После преобразования проводили визуальный контроль корректности ориентации изображений, целостности объёмов и соответствия данных исходным сериям.

Для предварительной (препроцессинг) и последующей обработки (постпроцессинг) данных функциональной МРТ в состоянии покоя, а также статистического анализа результатов использовали программный пакет CONN Toolbox (v20b), функционирующий на платформе MATLAB, с применением встроенного конвейера SPM12 (Statistical Parametric Mapping) для реализации ключевых этапов предварительной обработки. CONN Toolbox применяли для предварительной обработки данных, регрессии шумовых компонентов, для расчёта показателей функциональной связанности (seed-to-voxel, ROI-to-ROI), построения матриц связности и выполнения группового статистического анализа.

Обработку диффузионных данных выполняли в программе DSI Studio. Данный программный пакет использовали для контроля качества диффузионных изображений, проверки b-таблиц, реконструкции диффузионных данных, расчёта количественных показателей и последующей трактографии.

В качестве анатомического референса для совмещения структурных, функциональных и диффузионных данных использовали 3D T1-MPRAGE, что обеспечивало единую анатомическую основу для ко-регистрации, сегментации и нормализации изображений.

Поскольку фМРТ-сигнал содержит не только изменения оксигенации крови, связанные с нейрональной активностью, но и значительный вклад шумов (движение головы, дыхание, сердечная деятельность), на данном этапе применяли стандартные процедуры коррекции артефактов и регрессию мешающих факторов,

что обеспечивало повышение достоверности последующего анализа.

Предварительная обработка данных

Предобработка выполнялась с целью (1) устранения типичных артефактов (движение головы, EPI-искажения, физиологические шумы), (2) приведения данных к стандартному пространству для корректных групповых сравнений и (3) подготовки временных рядов BOLD и диффузионных данных к расчёту показателей функционального и структурного коннектома.

Предварительная обработка данных функциональной МРТ

Для каждого пациента в программное обеспечение CONN Toolbox загружали временные ряды BOLD-сигнала и соответствующее анатомическое изображение T1-MPRAGE. При импорте данных указывали время повторения TR, соответствующее параметрам BOLD-последовательности, после чего запускали стандартную предобработку данных в пакете CONN совместно со SPM12 (Statistical Parametric Mapping, 2014).

Предварительная обработка данных функциональной МРТ включала несколько последовательных этапов.

Мы начали с коррекции движений головы. Все функциональные объёмы выравнивались относительно выбранного эталонного изображения. При этом оценивались шесть параметров: три линейных смещения и три угловых поворота. Этот шаг позволил нам существенно ослабить влияние произвольных микродвижений пациентов на временной ход BOLD-сигнала.

Следующим этапом стала временная коррекция срезов. Её цель — скомпенсировать разницу в моментах регистрации разных срезов внутри одного объёма, чтобы впоследствии корректно сопоставлять временные ряды из различных зон мозга. Мы считаем этот этап обязательным, особенно при анализе функциональных связей.

Поскольку EPI-последовательности очень чувствительны к неоднородностям магнитного поля, мы применили коррекцию искажений восприимчивости, используя данные GRE Field Mapping. Благодаря этой

процедуре геометрические деформации BOLD-изображений уменьшились, а совмещение с анатомическими сканами стало точнее.

Затем мы провели ко-регистрацию функциональных томограмм с индивидуальными T1-MPRAGE-изображениями. В качестве промежуточного референса взяли усреднённое BOLD-изображение и совместили его с анатомическим объёмом, который в дальнейшем служил основой для сегментации и нормализации.

Сегментация T1-данных выполнялась с выделением трёх основных тканевых классов: серого и белого вещества, а также ликвора. Для этого мы использовали унифицированную процедуру, реализованную в SPM12. Учитывая детский возраст наших пациентов, мы заменили стандартные взрослые шаблоны на педиатрические, соответствующие возрастному диапазону группы. Параметры пространственного преобразования, рассчитанные по анатомическим данным, мы перенесли на функциональные. Для этого в качестве референса послужило среднее BOLD-изображение. В итоге все данные были приведены к единому координатному пространству MNI с одинаковым разрешением, что обеспечило их сопоставимость между разными пациентами и временными точками.

После расчёта преобразований мы нормализовали функциональные объёмы к стандартному пространству MNI. Чтобы повысить соотношение сигнал/шум и сгладить остаточные анатомические различия между испытуемыми (что особенно важно в педиатрической когорте), мы применили пространственное сглаживание гауссовым ядром с полной шириной на полувысоте 8 мм. Эта величина, на наш взгляд, представляет разумный компромисс между увеличением SNR и сохранением индивидуальных особенностей.

Финальные функциональные данные были приведены к ограничивающей рамке порядка $180 \times 216 \times 180$ мм с изотропным вокселем ~ 2 мм; анатомические изображения — с разрешением ~ 1 мм. Интерполяцию проводили сплайнами, стандартными для конвейера SPM12.

Качество данных мы оценивали, прежде всего, по уровню движений и наличию кадров-выбросов (outliers), способных исказить корреляционную

структуру BOLD-сигнала. Критериями для маркировки выбросов служили: покадровое смещение (Frame-wise Displacement) более 0,9 мм и отклонение глобального BOLD-сигнала от среднего уровня более чем на 3 стандартных отклонения. Эти кадры мы не удаляли из временного ряда, а включали в модель как отдельные регрессоры. Так мы минимизировали их негативное влияние, сохранив все доступные данные.

На этапе денойзинга мы построили регрессионную модель, куда вошли: шумовые компоненты, выделенные из областей белого вещества и ликвора методом aCompCor, параметры движения с этапа realignment, а также регрессоры выбросов. Для каждого вокселя мы отдельно удаляли нежелательные составляющие с помощью этой модели.

Затем к очищенным временным рядам применили полосовую фильтрацию в диапазоне 0,008–0,09 Гц. Мы остановились именно на этом частотном окне, чтобы сохранить низкочастотные колебания BOLD-сигнала, наиболее информативные для оценки функциональной связанности, и одновременно подавить высокочастотные физиологические шумы и медленные дрейфы.

Обработку DWI-данных мы проводили в среде DSI Studio. Вначале импортировали исходные томограммы и тщательно проверили b-таблицу, в ней содержатся все сведения о направлениях диффузионного кодирования и значениях b-фактора. Мы относимся к этому этапу с особым вниманием, так как ошибки в ориентации градиентов могут свести на нет последующую реконструкцию трактов.

При контроле качества мы оценивали геометрию срезов, пространственное разрешение, общее число DWI-томов, согласованность направлений диффузии. Кроме того, мы визуально просматривали каждый набор на предмет артефактов движения, выпадения сигнала и деформаций. Дополнительно мы анализировали корреляцию между соседними DWI-объёмами с близкими градиентными направлениями: если корреляция падала, это служило сигналом о возможных двигательных артефактах, влиянии вихревых токов или технических сбоях.

Для выявления статистически аномальных данных мы применяли правило

трёх медианных абсолютных отклонений, после чего все подозрительные случаи проверяли вручную, сопоставляя с исходными изображениями и b-таблицей.

Далее мы перешли к реконструкции. Основными количественными показателями микроструктуры белого вещества стали фракционная анизотропия и средняя диффузивность. Дополнительно рассчитывали осевую и радиальную диффузивность. В рамках DSI Studio мы использовали модели DTI, GQI и QSDR. Последний подход (QSDR) позволил нам восстановить диффузионные характеристики непосредственно в пространстве MNI это упростило последующие групповые сравнения.

Для оценки функциональной связанности мы взяли уже очищенные и отфильтрованные временные ряды BOLD-сигнала. Анализ строился на вычислении корреляций между этими рядами из разных мозговых областей.

В CONN Toolbox мы реализовали два подхода, которые хорошо дополняют друг друга: seed-to-voxel и ROI-to-ROI. В первом случае временной ход из выбранной области интереса сопоставлялся с сигналом каждого вокселя мозга, что давало индивидуальные карты связности для заранее определённых функционально значимых зон. Во втором мы попарно коррелировали все ROI между собой, а полученные коэффициенты преобразовывали с помощью z-преобразования Фишера для дальнейшего параметрического анализа. На выходе для каждого пациента и каждого временного среза мы имели индивидуальную матрицу функциональных связей.

Эти карты и матрицы стали основой для группового сравнения между точками T0 и T1, а также для оценки различий в динамике между основной и контрольной группами.

По завершении предобработки и реконструкции мы количественно охарактеризовали микроструктуру белого вещества. Для каждой модели (DTI, GQI, QSDR) мы вычисляли фракционную анизотропию, среднюю, осевую и радиальную диффузивность, а при использовании GQI/QSDR ещё и количественную анизотропию.

Применение QSDR, напомним, дало нам возможность сразу получать

значения в стандартном пространстве MNI, что сделало данные разных пациентов и визитов полностью сопоставимыми.

Кроме того, мы выполнили трактографию, реконструкцию основных проводящих путей с использованием встроенных алгоритмов DSI Studio. Это позволило оценить состояние целостности белого вещества в динамике.

Итоговые количественные параметры и тракторные карты мы использовали для анализа изменений от T0 к T1 и для сопоставления с показателями функциональной связанности и клиническими данными. Такой комплексный подход дал нам возможность исследовать структурно-функциональные взаимодействия в рамках коннектомной парадигмы.

2.5 Методика лечения

В обеих группах проводилось стандартное комплексное лечение, включавшее лечебную физкультуру, физиотерапию и массаж в сопоставимом объёме по длительности и частоте. В основной группе стандартная программа была дополнена занятиями с применением нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ», структура и этапы проведения которых представлены в таблице 8.

В основной группе дополнительно применяли костюм «Reforma-ТЭКТ». Курс составлял 4–5 недель (5 занятий в неделю, всего 15–20 сессий) под контролем сертифицированных специалистов.

Структура занятий была стандартизирована и включала три этапа: подготовительный, основной и заключительный (Таблица 8). Подготовительный этап (5–10 мин) включал осмотр и подгонку костюма; основной (40–60 мин) – выполнение комплекса упражнений, направленных на коррекцию позы, тренировку ходьбы, равновесия и межсегментарной координации; заключительный (5–10 мин) – оценку состояния пациента и переносимости нагрузки.

Таблица 8 – Этапы занятия с костюмом «Reforma-ТЭКТ»

Этап занятия	Длительность	Содержание этапа	Цель и функциональная направленность
Подготовительный этап	5–10 мин	Осмотр кожных покровов и ОДА; индивидуальная подгонка костюма; проверка контакта электродов; инструктаж ребёнка и родителей	Обеспечение безопасности, оптимального биомеханического положения и готовности к нагрузке
Основной этап	40–60 мин	Выполнение комплекса упражнений в костюме с дозированной компрессией и электроимпульсной стимуляцией • статические позы (стояние у/без опоры); • динамические упражнения (ходьба, повороты, шаги назад, приседания); • задания на перенос массы тела и равновесие; • вертикализация и удержание позы; • элементы игровой терапии Индивидуальная адаптация сложности и интенсивности с учётом GMFCS, и переносимости нагрузки	Формирование физиологического двигательного паттерна, активация проприоцептивной афферентации; Улучшение устойчивости, контроля походки, стабилизации корпуса и межсегментарной координации; Персонализация воздействия при сохранении стандартизации протокола
Заключительный этап	5–10 мин	Снятие костюма; оценка общего состояния; фиксация объёма выполненной активности и возможных нежелательных реакций	Контроль переносимости, профилактика перегрузки, документирование сеанса

Схематическая структура одного занятия представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Структура одного занятия с применением костюма «РЕФОРМА-ТЭКТ»

Интенсивность и сложность упражнений индивидуализировали с учётом

уровня двигательного развития по GMFCS, способности удержания позы сидя, выраженности мышечного тонуса и переносимости нагрузки при сохранении общей структуры протокола.

В группе сравнения проводили аналогичный по длительности курс стандартного лечения без применения костюма.

Костюм «Reforma-ТЭКТ» представляет собой носимую систему, сочетающую компрессионное, ортезное и электроимпульсное воздействие с элементами биологической обратной связи (Рисунок 6). Его применение направлено на усиление проприоцептивной афферентации, стабилизацию сегментов тела и формирование физиологичных двигательных паттернов.



Рисунок 6 – Костюм «Reforma-ТЭКТ»

Таким образом, представленные дизайн исследования, характеристики выборки, диагностический алгоритм и методы анализа обеспечивают методологическую обоснованность исследования, сопоставимость групп и возможность корректной интерпретации клинико-нейровизуализационных изменений, ассоциированных с проводимым лечением.

На основании изложенного можно сформулировать следующие выводы.

Проведённое исследование выполнено как проспективное продольное

когортное с оценкой показателей в динамике (T0–T1) и наличием группы сравнения, что обеспечивает возможность анализа эффекта лечения с учётом временного фактора. В работе приняли участие 178 детей со спастической диплегией (детский церебральный паралич). Их разделили на две группы основную и контрольную, причём по возрасту, полу и тяжести двигательных нарушений (оценённой по шкале GMFCS) группы оказались практически идентичны: различия статистически незначимы ($p > 0,05$). Это даёт нам основание считать, что исходные межгрупповые расхождения не исказят конечные результаты. Дополнительно мы стратифицировали пациентов по возрасту, функциональным возможностям, гестационному сроку и характеру органического поражения мозга, так мы постарались учесть возможные смешивающие факторы и снизить влияние внутренней неоднородности выборки.

Диагностическая программа была построена как мультимодальная. С одной стороны, мы провели развёрнутое клинико-неврологическое обследование (с использованием шкал GMFCS, Hare/Hallet, MACS, SATCo, Ashworth, гониометрии и CFCS), с другой применили несколько вариантов МРТ (структурную, диффузионную и функциональную). Такой подход позволил получить одновременно и клинический, и нейробиологический «срез» состояния каждого ребёнка. Чтобы данные на разных временных точках были сопоставимы, мы строго стандартизировали протоколы: на первом этапе (T0) обследование было расширенным, на втором (T1) сокращённым. Благодаря этому мы можем корректно отслеживать динамику структурной и функциональной коннективности мозга. Кроме того, вся обработка изображений велась в едином программном контуре с унифицированными шагами препроцессинга это повышает надёжность и воспроизводимость результатов.

Для статистического анализа мы выбрали модель с повторными измерениями, где оценивалось взаимодействие двух факторов: «время» и «группа». Такая схема позволяет уловить как внутренние изменения внутри каждой группы, так и различия между группами, обусловленные именно лечебным воздействием. Лечебный протокол в обеих группах был одинаковым,

но в основной группе дополнительно применялся костюм «Reforma-ТЭКТ» это даёт возможность чётко выделить вклад именно этого компонента в наблюдаемые клинические и нейровизуализационные сдвиги.

2.6 Методы статистического анализа

В качестве инструментов статистической обработки мы использовали пакет CONN Toolbox v20b, а также надстройки Excel-Статистика (на базе Microsoft Office). Анализ включал как описательные процедуры, так и сравнение групп между собой.

Для описательной статистики, применяемой к оценке клинических изменений в динамике, использовали показатели среднего значения, стандартной ошибки, стандартного отклонения, а также уровень надежности (95%) с определением р-значения.

Гипотезы на уровне вокселей оценивались на базе Conn-Toolbox с применением многомерной параметрической статистики со случайными эффектами для испытуемых и последующей выборочной оценкой ковариации по нескольким измерениям.

Результаты вычислялись на уровне отдельных кластеров (групп смежных вокселей) и основывались на параметрической статистике с применением гауссовской теории случайного поля. За пороговый уровень принимались значения $p < 0,001$ на уровне вокселя (без коррекции) и $p\text{-FDR} < 0,01$ для размера кластера. В качестве непараметрической методики обчета использовался анализ перестановки/рандомизации с применением 1000 случайных повторений остаточной рандомизации, пороговые значения составляли соответственно $p < 0,01$ для $p\text{-FDR}$ скорректированной массы кластера, $p < 0,001$ для размера вокселя.

Для оценки межрегиональной коннективности (RRS, ROI-to-ROI) использовалась параметрическая одновариантная статистика с отображением связанности (Benjamini Y., Hochberg Y., 1995), $p < 0,05$ для $p\text{-FDR}$

корректированных значений.

В качестве метрик теории графов при оценке связей «регион-регион» (с $p < 0,05$) вычислялись глобальная и локальная эффективность, степень посредничества, степень близости узла, мера влияния вершины, эксцентриситет, ценность, общая длина пути, коэффициент кластеринга и степень вершины.

Статистическую обработку данных проводили с учётом продольного дизайна исследования и наличия основной группы и группы сравнения. Нормальность распределения количественных показателей оценивали с помощью критерия Шапиро–Уилка. Для сравнения независимых выборок использовали t-критерий Стьюдента или критерий Манна–Уитни, для оценки внутригрупповой динамики — парный t-критерий либо критерий Уилкоксона. Категориальные показатели сравнивали с использованием критерия χ^2 Пирсона или точного критерия Фишера. При множественных сравнениях применяли коррекцию Benjamini–Hochberg. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Результаты традиционной магнитно-резонансной томографии

Всего было обследовано 178 детей с ДЦП по типу спастической диплегии в возрасте от 4 до 15 лет, в двух временных точках: до начала курса лечения (T0) и через 1 месяц после его завершения (T1).

По данным электроэнцефалографического исследования у большинства пациентов регистрировались неспецифические диффузные изменения биоэлектрической активности головного мозга различной степени выраженности, соответствующие последствиям перинатального поражения центральной нервной системы. Клинически значимая эпилептиформная активность, являющаяся основанием для исключения из исследования, не выявлена.

Пациенты были распределены на основную группу (n=95), получавшую стандартное лечение в сочетании с использованием нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ», и группу сравнения (n=83), проходившую стандартную терапию без применения костюма. Группы были сопоставимы по возрасту, полу и исходным клинико-функциональным показателям.

При применении стандартных импульсных последовательностей (T1-ВИ, T2-ВИ, FLAIR) у всех пациентов выявлены структурные изменения вещества головного мозга, преимущественно затрагивающие белое вещество.

Структурные изменения вещества головного мозга по данным стандартных импульсных последовательностей (T1-ВИ, T2-ВИ, FLAIR) выявлены у всех 178 пациентов. Изменения преимущественно затрагивали перивентрикулярное белое вещество и соответствовали последствиям перинатального гипоксически-ишемического повреждения. Доминирующий тип поражения – перивентрикулярная лейкомаляция (изолированная или в сочетании с внутрижелудочковыми кровоизлияниями) – наблюдался в 84,9% случаев в основной группе и в 82,3% – в группе сравнения. Данные изменения формировали

типичный нейрорадиологический паттерн, характерный для спастической диплегии.

Данная локализация анатомически соответствует зонам прохождения проекционных проводящих путей (прежде всего кортикоспинальных трактов), а также ассоциированные проводящие системы, участвующие в регуляции постурального контроля, координации и ходьбы. Такая локализация структурного повреждения определяет его ведущую роль в формировании двигательного дефицита.

Во всех случаях изменения носили хронический характер, без признаков острого повреждения, и соответствовали исходу раннего поражения незрелого мозга.

При этом выраженность морфологических нарушений варьировала между пациентами, что указывает на неоднородность структурного субстрата при клинически сходной форме заболевания.

Таким образом, для детей со спастической диплегией характерно преобладание перивентрикулярного поражения белого вещества, формирующего морфологическую основу двигательных нарушений и определяющего исходный фон для последующей функциональной реорганизации мозговых сетей.

Для повышения нейровизуализационной валидности исследования и последующей корректной интерпретации клинико-радиологических взаимосвязей все пациенты были стратифицированы по преобладающему типу структурного поражения головного мозга.

Распределение вариантов перинатального поражения в основной группе и группе сравнения представлено в таблице 9.

Таблица 9 – Распределение типов перинатального поражения головного мозга в основной и группе сравнения

Тип поражения	Основная группа (%)	Группа сравнения (%)
Перивентрикулярная лейкомаляция (ПВЛ)	49,5	46,1
ПВЛ + ВЖК	35,4	36,2
Изолированные ВЖК I–II степени	13,5	15,5
ВЖК III степени	1,6	2,2
ВЖК IV степени	0	8,1

Из данных таблицы 9 следует, что наиболее распространённым вариантом поражения являлась перивентрикулярная лейкомаляция (изолированная или в сочетании с ВЖК) — 84,9 % в основной группе и 82,3 % в группе сравнения. Она выявлялась как в изолированном виде, так и в сочетании с внутрижелудочковыми кровоизлияниями, суммарно формируя наибольшую долю наблюдений (Рисунок 7).

Такая структура поражения представляется закономерной, поскольку в обеих группах преобладали дети, рождённые преждевременно, а именно для недоношенных новорождённых наиболее характерно повреждение перивентрикулярного белого вещества.

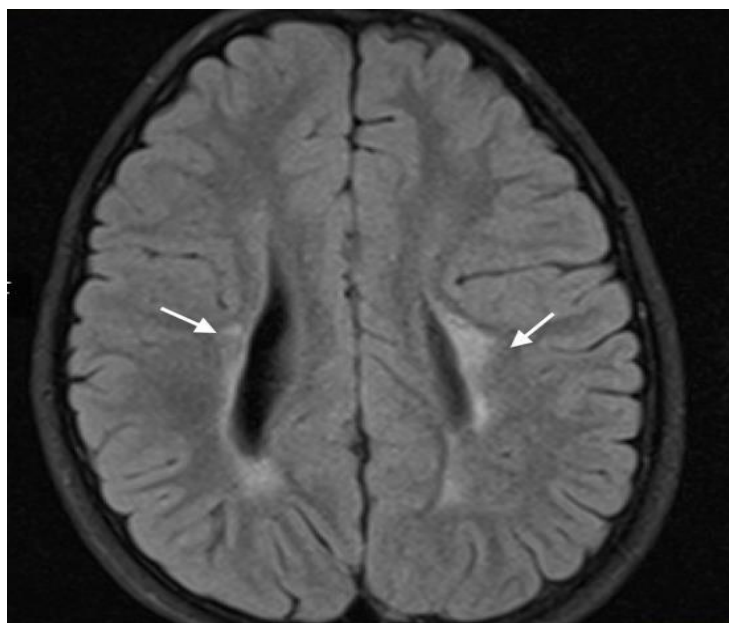


Рисунок 7 – Пациент А., 7 лет, ДЦП, форма спастическая диплегия (амб. № 36/2021). На TIRM-ВИ в аксиальной плоскости указаны перивентрикулярные постгипоксические глиозные изменения белого вещества головного мозга (стрелки). Характерным признаком является плотное прилегание изменений к боковым желудочкам с деформацией их стенок

Изолированные последствия внутрижелудочковых кровоизлияний I–II степени выявлены у 13,5% пациентов основной группы и у 15,5% пациентов группы сравнения. Последствия внутрижелудочковых кровоизлияний III степени встречались редко и определялись у 1,6% основной группы и у 2,2% пациентов группы сравнения.

Внутрижелудочковые кровоизлияния IV степени выявлялись только в группе сравнения и составили 8,1% наблюдений. Такое распределение отражает клинически ожидаемую структуру остаточных морфологических изменений при спастической диплегии и подтверждает, что основную массу пациентов составляли дети с хроническим поражением белого вещества средней степени выраженности, а не с грубым многоочаговым разрушением ткани мозга.

Проведенная стратификация позволила не только формально описать МР-картину, но и подготовить основу для последующего анализа, поскольку тип перинатального поражения влияет на выраженность двигательных расстройств, особенности проводящих путей и характеристики функциональной связности. Иначе говоря, одинаковый клинический диагноз «спастическая диплегия» в пределах выборки не был морфологически однородным, но при этом распределение основных типов поражения оставалось достаточно сопоставимым между группами.

Таким образом, распределение типов перинатального повреждения головного мозга в исследуемой выборке характеризовалось доминированием перивентрикулярной лейкомаляции, значимой долей ВЖК I - II степени, относительно редким выявлением ВЖК III степени и единичными случаями ВЖК IV степени. Данный профиль хорошо соответствует нейрорадиологической картине детей со спастической диплегией, сформировавшейся на фоне преждевременного рождения и раннего перинатального повреждения мозга.

Сравнительная характеристика структурных изменений в основной группе и группе сравнения.

Для оценки сопоставимости основной группы и группы сравнения проведён сравнительный анализ распределения типов перинатального поражения головного мозга.

Статистически значимых различий между группами по структуре морфологических изменений выявлено не было ($p > 0,05$ для всех категорий).

В обеих группах сохранялся сходный профиль поражения, характеризующийся преобладанием перивентрикулярной лейкомаляции и её

сочетания с внутрижелудочковыми кровоизлияниями, а также относительно меньшей долей изолированных ВЖК I–II степени. Тяжёлые формы геморрагического поражения (ВЖК III–IV степени) встречались редко.

Несмотря на отдельные различия в частоте отдельных категорий (в частности, наличие случаев ВЖК IV степени в группе сравнения), данные изменения не носили статистически значимого характера.

Таким образом, основная группа и группа сравнения были сопоставимы по типу структурного поражения головного мозга, что позволяет интерпретировать последующие различия функциональных и клинических показателей как результат лечебного воздействия, а не исходных морфологических различий.

Дополнительно установлено, что в обеих группах преобладали дети, рожденные раньше срока, что подтверждает единый патогенетический механизм формирования выявленных изменений.

Связь морфологических изменений с клиническими показателями.

Анализ сопоставления структурных изменений с клиническими данными показал, что тяжесть структурного поражения в целом соответствует выраженности двигательных нарушений.

Более выраженные формы перинатального повреждения (в частности ВЖК III степени и сочетанные поражения) ассоциировались с более высоким уровнем двигательного дефицита (GMFCS III), тогда как при преобладании ПВЛ и ВЖК I–II степени чаще наблюдался II уровень GMFCS.

Аналогичная зависимость прослеживалась и при оценке уровня двигательного развития: более выраженное структурное поражение сопровождалось более высоким уровнем двигательных ограничений по шкале GMFCS.

Вместе с тем выявленная связь не носила строго линейного характера. Как показывает клиническая практика, даже при сходных морфологических отклонениях на МРТ течение заболевания у разных пациентов может сильно различаться. Это лишний раз подтверждает, ключевую роль играет не столько

само структурное повреждение, сколько то, как функционально перестраиваются нейронные связи и насколько активно запускаются механизмы нейропластичности.

Справедливости ради, классическая МРТ очень хорошо «видит» грубые анатомические дефекты головного мозга. Однако нормальная картина при таком исследовании вовсе не означает, что диагноз детского церебрального паралича можно снимать со счетов. И это понятно, ДЦП по своей сути синдром клинический, он возникает из-за раннего поражения центральной нервной системы и даёт о себе знать прежде всего стойкими двигательными расстройствами. А инструментальные методы вроде МРТ здесь играют лишь вспомогательную роль, помогают уточнить, где именно и какого характера повреждение, но не более того.

К тому же стандартная МРТ в основном даёт информацию о крупных макроструктурных изменениях. Она гораздо менее чувствительна к тому, что происходит на микроуровне: как изменены проводящие пути, в какой стадии находится миелинизация, как организованы нейросетевые взаимодействия. А ведь именно эти тонкие нарушения зачастую определяют реальную клиническую картину, и их-то традиционная нейровизуализация как раз и упускает.

В ряде случаев, особенно при менее выраженных или диффузных формах перинатального повреждения, структурные изменения могут не выявляться при стандартных МР-последовательностях.

Кроме того, значительную роль играют процессы нейропластичности и функциональной реорганизации мозга, в результате которых морфологические изменения могут быть частично компенсированы, тогда как функциональные нарушения сохраняются.

В связи с этим для более полной оценки состояния ЦНС у пациентов с ДЦП целесообразно использование дополнительных методов нейровизуализации, включая функциональную МРТ и диффузионно-тензорную томографию, позволяющих выявлять нарушения коннективности и оценивать процессы нейропластичности.

3.2 Результаты функциональной магнитно-резонансной томографии в состоянии покоя

Данные фМРТ в покое предоставляют уникальную возможность оценить изменения в организации функциональных сетей мозга после лечения.

Представленные результаты анализа основаны на применении GLM (General Linear Model – общая линейная модель), широко используемой в нейровизуализации для оценки влияния экспериментальных факторов на вариабельность сигнала BOLD (Blood Oxygen Level Dependent – зависимый от уровня оксигенации крови сигнал).

В рамках анализа функциональной коннективности был выполнен ROI-to-ROI анализ (Region of Interest – область интереса), позволяющий оценивать статистические взаимосвязи между заранее определёнными анатомическими и функциональными зонами головного мозга.

Для того чтобы уловить тонкие, многомерные расхождения в том, как организованы функциональные сети, я прибегнул к методу MVPA, многомерному анализу паттернов. Первым шагом здесь стал так называемый omnibus-тест, то есть общий глобальный статистический критерий. Его задача не искать, какие именно пары связей различаются, а просто ответить на вопрос: есть ли вообще значимые различия в целостной структуре взаимодействий между состояниями или группами. Это как бы «грубая» проверка, которая задаёт направление для дальнейшего анализа.

Но на этом я не остановился. Дополнительно я применил кластерный подход, а именно пространственную парную кластеризацию (SPC). Здесь уже речь идёт о более детальной оценке. В рамках этого метода я рассматривал два ключевых параметра. Первый масса кластера, которая представляет собой нечто вроде интегрального показателя. Она одновременно учитывает и физический размер кластера, и накопленную величину статистического эффекта внутри него. Второй интенсивность кластера, то есть пиковое значение эффекта, достигнутое в самой выраженной точке этого скопления.

Сочетание этих двух подходов даёт надёжную картину устойчивых и пространственно связанных изменений функциональной коннективности. И что немаловажно, такая стратегия позволяет корректно скорректировать результаты с учётом множественных сравнений.

Оценивались как внутрисетевые, так и межсетевые взаимодействия, в том числе с сетью пассивного режима работы мозга (default mode network, DMN).

Исходные особенности функциональной коннективности у детей с ДЦП

При анализе исходных данных фМРТ покоя у пациентов со спастической диплегией выявлены характерные изменения функциональной архитектуры головного мозга.

Наиболее выраженные особенности касались сенсомоторной сети и её взаимодействия с другими функциональными системами:

- нарушения внутрисетевой интеграции сенсомоторной сети;
- атипичных межсетевых взаимодействий;
- повышенной функциональной сопряжённости между сенсомоторной сетью и сетью пассивного режима работы мозга.

В исходном состоянии отмечалось нарушение согласованности активности между ключевыми узлами сенсомоторной сети, прежде всего между первичной моторной корой и дополнительной моторной областью.

Подобный паттерн отражает снижение функциональной сегрегации между сетями, участвующими в выполнении двигательных задач, и системами фоновой активности, что характерно для пациентов с детским церебральным параличом.

Одновременно регистрировалась атипичная организация межсетевых взаимодействий, проявлявшаяся в избыточной функциональной сопряжённости сенсомоторной сети с сетью пассивного режима работы мозга. Подобный паттерн отражает снижение функциональной сегрегации между системами, отвечающими за выполнение двигательных задач и за внутреннюю (фоновую) активность мозга.

Таким образом, исходная функциональная организация мозга у детей с ДЦП характеризовалась сочетанием снижения эффективности внутрисетевой интеграции в моторной системе и нарушением межсетевого баланса.

Ключевые направления изменений функциональной коннективности:

1. Усиление связей в салиентной сети (Salience Network, SN) – одна из ключевых функциональных сетей мозга, которая отвечает за выделение значимых (salient) стимулов и переключение внимания, с правой передней островковой долей (Right Anterior Insula, R AInsula).

После курса лечения было отмечено усиление функциональной связности передней островковой коры с правой фронтальной покрывкой, правой скорлупой, с правой теменной корой и левой передней верхней височной извилиной ($T=2,36-2,76$; $p=0,0217-0,0079$) (Таблица 10, 11, Рисунок 8), при одновременном снижении коннективности с левой верхней латеральной затылочной корой ($T=-2,15$; $p=0,0359$) (Таблица 11). Это может указывать на повышение эффективности сети выявления значимости, вероятно связанное с улучшением переключения внимания на двигательные задачи и интеграцией сенсорной информации.

Таблица 10 – Усиление функциональной связности правой передней островковой доли с другими областями головного мозга

Связь	Структура (RU)	Структура (EN)	T-значение	p-unc
R AInsula – FO r	Правая кора лобной покрывки	Right Frontal Operculum Cortex	2.76	0.007853
R AInsula – Putamen r	Правая скорлупа	Right Putamen	2.45	0.017587
R AInsula – PPC r	Правая задняя теменная кора	Right Posterior Parietal Cortex (Frontoparietal Network node)	2.41	0.019027
R AInsula – aSTG l	Левая передняя верхняя височная извилина	Left anterior Superior Temporal Gyrus	2.36	0.021659

Таблица 11 – Ослабление функциональной связности правой передней островковой доли с другими областями головного мозга

Связь	Структура (RU)	Структура (EN)	T-значение	p-unc
R AInsula – sLOC l	Левая верхняя латеральная затылочная кора	Left superior Lateral Occipital Cortex	-2.15	0.035914

между сетью пассивного режима работы мозга, фронтопариетальной сетью и сетью внимания. Полученные данные отражают вовлечение в процессы нейропластической реорганизации не только сенсомоторных, но и ассоциативных церебральных сетей.

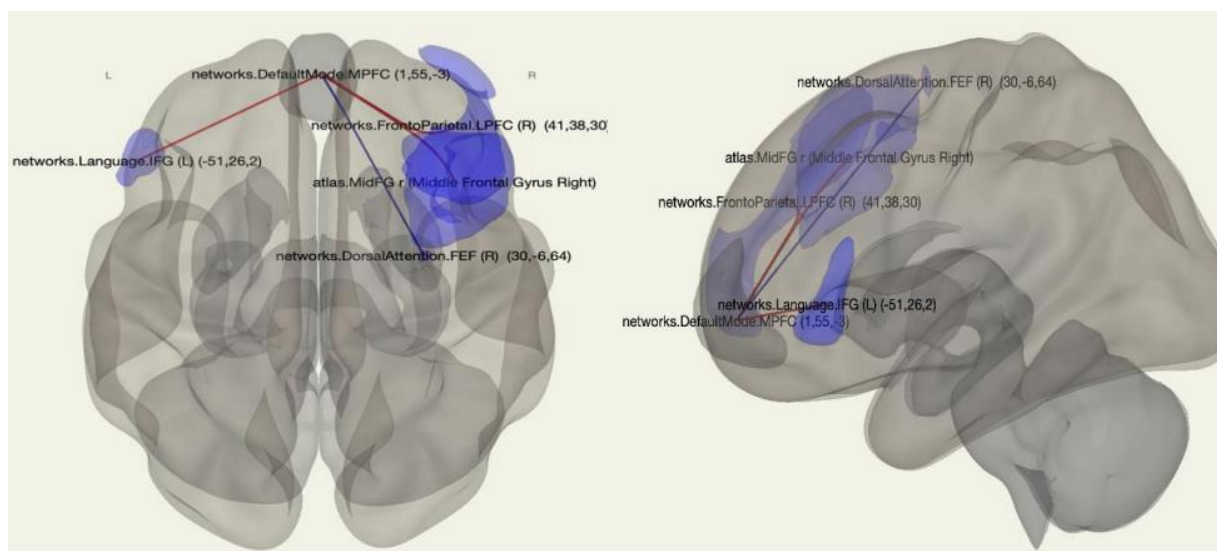


Рисунок 9 – Изменения функциональной коннективности медиальной префронтальной коры после курса лечения по данным ROI-to-ROI анализа. Красным цветом обозначено усиление функциональной связанности, синим – её снижение.

3. Изменения в подкорково-мозжечковых взаимодействиях (Кластер 1)

В подкорково-мозжечковой сети отмечено снижение функциональной связности: левого хвостатого ядра – с корой мозжечка (доли IV–V и VI; T от $-4,64$ до $-2,58$; $p < 0,013$), (Таблица 12, Рисунок 11). Поскольку при ДЦП нередко наблюдается повышенная коннективность базальных ганглиев и мозжечка, это снижение можно трактовать как сдвиг к более физиологичной фоновой нейродинамике, что согласуется с уменьшением спастичности и улучшением селективности движений.

Таблица 12 – Ослабление функциональной связности в подкорково-мозжечковом кластере

Связь	Структура 1 (RU/EN)	Структура 2 (RU/EN)	T-значение	p-unc
L Caudate – Cereb6 r	Левое хвостатое ядро (Left Caudate)	Правая доля VI мозжечка (Right Cerebellum VI)	-4.64	0.000021
L Caudate – Cereb6 l	Левое хвостатое ядро (Left Caudate)	Левая доля VI мозжечка (Left Cerebellum VI)	-3.59	0.000689
L Caudate – Cereb45 r	Левое хвостатое ядро (Left Caudate)	Правая доля IV–V мозжечка (Right Cerebellum IV–V)	-3.49	0.000936
L Caudate – Cereb45 l	Левое хвостатое ядро (Left Caudate)	Левая доля IV–V мозжечка (Left Cerebellum IV–V)	-2.58	0.012637
R Caudate – Cereb6 r	Правое хвостатое ядро (Right Caudate)	Правая доля VI мозжечка (Right Cerebellum VI)	-2.58	0.012666

Дополнительно при анализе функциональной коннективности выявлено усиление взаимодействий между островковой корой, структурами мозжечка и компонентами сети пассивного режима работы мозга, включая заднюю поясную извилину (Рисунок 10). Усиление данных связей свидетельствует о вовлечении механизмов межсетевой интеграции, обеспечивающих взаимодействие сенсомоторных, подкорковых и ассоциативных церебральных систем.

Полученные результаты позволяют предположить, что процессы нейропластической перестройки затрагивают не отдельные зоны головного мозга, а распределённые функциональные сети, участвующие в реализации двигательных и постуральных функций.

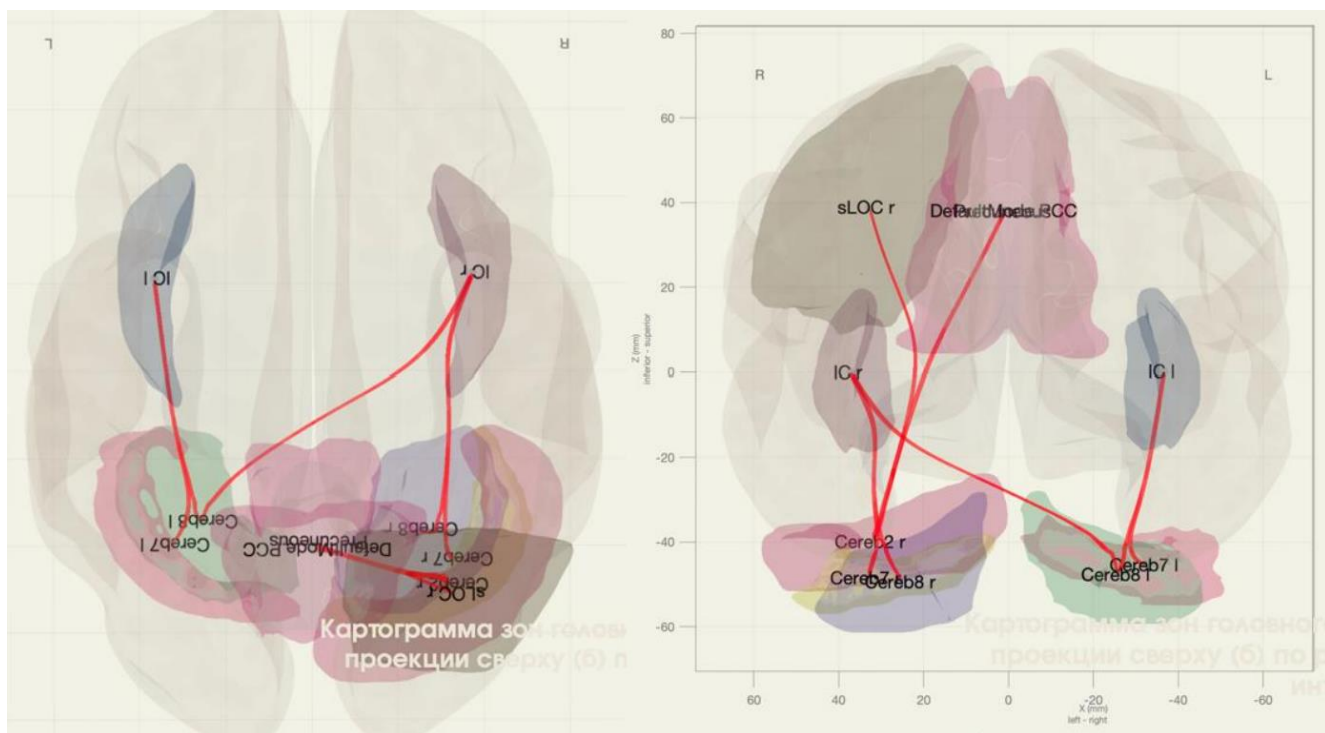


Рисунок 10 – Изменения функциональной коннективности между островковой корой, структурами мозжечка и компонентами сети пассивного режима работы мозга после курса лечения. Красным цветом обозначено усиление функциональной связанности

4. Изменения во взаимодействии сети пассивного режима (Default Mode Network, DMN), салиентной сети (Salience Network, SN) и зрительной коры (Кластер 2)

При анализе функциональной коннективности выявлен кластер (Score = 15.90; $p\text{-unc} = 0.075037$; Mass = 96.92; $p\text{-unc} = 0.015273$; Size = 20; $p\text{-unc} = 0.007788$), характеризующийся преимущественным ослаблением межсетевых взаимодействий между компонентами сети пассивного режима работы мозга (Default Mode Network, DMN), салиентной сети (Salience Network, SN), зрительной коры и моторно-когнитивных областей (Таблица 13).

В частности, зарегистрировано снижение функциональной связности между правой латеральной теменной корой (Right Lateral Parietal cortex, R LP), входящей в состав сети пассивного режима работы мозга, и передней поясной корой (Anterior Cingulate Cortex, ACC), являющейся ключевым узлом салиентной сети, с $T = -2.56$ ($p\text{-unc} = 0.013340$).

Также выявлено ослабление связей между левой верхней латеральной

затылочной корой (Left superior Lateral Occipital Cortex, L sLOC) и дополнительной моторной областью (Supplementary Motor Area, SMA) как слева, так и справа (SMA L и SMA R) с $T = -2.36$ и $T = -2.19$ соответственно, а также с передней поясной корой (ACC) с $T = -2.24$.

Дополнительно отмечено снижение функциональной связности между левой латеральной теменной корой (Left Lateral Parietal cortex, L LP), относящейся к сети пассивного режима работы мозга, и дополнительной моторной области L ($T = -2.23$), а также между правой верхней латеральной затылочной корой (Right superior Lateral Occipital Cortex, R sLOC) и дополнительной моторной областью L / ACC с $T = -2.16$ и $T = -2.07$ соответственно (Рисунок 10).

Таблица 13 – Ослабление функциональной связности между сетью пассивного режима работы мозга, салиентной сетью и зрительной корой

Связь	Структура 1 (RU/EN)	Структура 2 (RU/EN)	T-значение	p-unc
R LP – ACC	Правая латеральная теменная кора (Right Lateral Parietal, DMN)	Передняя поясная кора (Anterior Cingulate Cortex, SN)	-2.56	0,0133
L sLOC – SMA L	Левая верхняя латеральная затылочная кора (Left superior Lateral Occipital Cortex)	Левая дополнительная моторная область (Supplementary Motor Area)	-2.36	0,0218
L sLOC – SMA R	Левая верхняя латеральная затылочная кора	Правая дополнительная моторная область	-2.19	0,0327
L sLOC – ACC	Левая верхняя латеральная затылочная кора	Передняя поясная кора	-2.24	0,0291
L LP – SMA L	Левая латеральная теменная кора (DMN)	Левая дополнительная моторная область	-2.23	0,0298
R sLOC – SMA L	Правая верхняя латеральная затылочная кора	Левая дополнительная моторная область	-2.16	0,0351
R sLOC – ACC	Правая верхняя латеральная затылочная кора	Передняя поясная кора	-2.07	0,0431

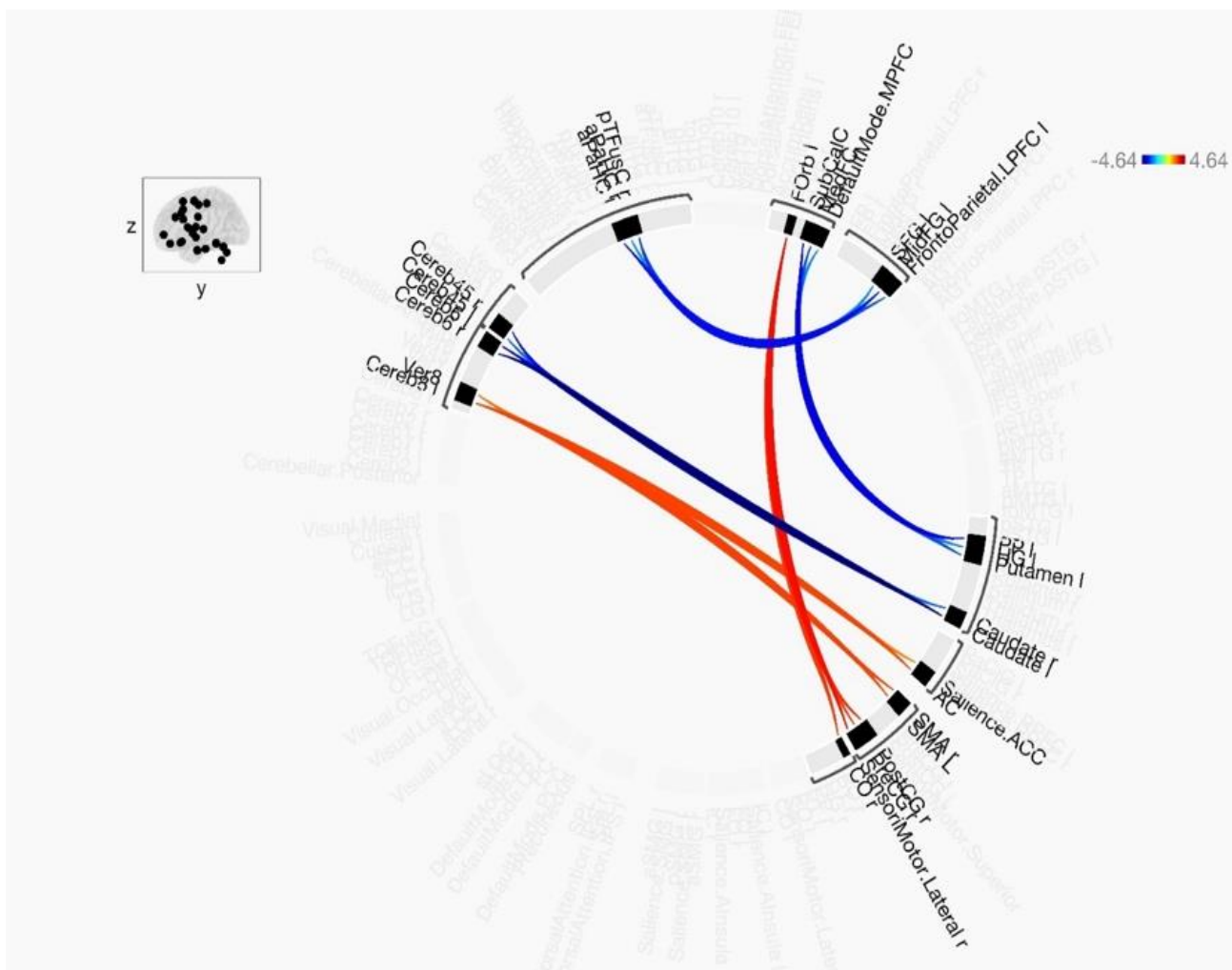


Рисунок 11 – Коннектограмма изменений функциональной связности между различными структурами головного мозга у пациентов с ДЦП по результатам сравнения двух временных точек (до и после курса) в двух сопоставимых группах: основной (программа лечения с костюмом «Reforma-ТЭКТ») и группой сравнения (программа лечения без костюма). Градация цвета отражает значения p (FDR corr); переход к красно-бордовым оттенкам соответствует усилению связности

5. Усиление связей левой орбитофронтальной коры (Orbitofrontal Cortex, FOrb) с сенсомоторными регионами (Кластер 3)

При анализе функциональной связности выявлен кластер (Score = 25.40; p -unc = 0.015403; Mass = 94.21; p -unc = 0.016242; Size = 12; p -unc = 0.028302), характеризующийся значимым усилением функциональной связности (functional connectivity, FC) левой орбитофронтальной коры (Left Orbitofrontal Cortex, L FOrb) с рядом сенсомоторных областей (таблица 14; Рисунок 11).

В частности, отмечено усиление связей с правой латеральной сенсомоторной корой (Right Sensorimotor Lateral cortex) с $T = 3.39$ (p -unc = 0.001282), правой

постцентральной извилиной (Right Postcentral Gyrus, R PostCG) с $T = 3.10$ ($p\text{-unc} = 0.003027$), правой центральной покрышечной корой (Central Opercular Cortex, R CO) с $T = 3.02$ ($p\text{-unc} = 0.003857$), а также с правой прецентральной извилиной (Right Precentral Gyrus, R PreCG) с $T = 2.89$ ($p\text{-unc} = 0.005430$).

Дополнительно выявлено усиление связей с верхней сенсомоторной корой (Sensorimotor Superior cortex) с $T = 2.07$ ($p\text{-unc} = 0.042754$) и левой постцентральной извилиной (Left Postcentral Gyrus, L PostCG) с $T = 2.06$ ($p\text{-unc} = 0.044264$).

Таблица 14 – Усиление функциональной связности левой орбитофронтальной коры с сенсомоторными областями

Связь	Структура 1 (RU/EN)	Структура 2 (RU/EN)	T-значение	p-unc
L FOrb – SM Lateral r	Левая орбитофронтальная кора (Left Orbitofrontal Cortex)	Правая латеральная сенсомоторная кора (Right Sensorimotor Lateral)	3.39	0.001282
L FOrb – PostCG r	Левая орбитофронтальная кора	Правая постцентральная извилина (Right Postcentral Gyrus)	3.10	0.003027
L FOrb – CO r	Левая орбитофронтальная кора	Правая центральная покрышечная кора (Central Opercular Cortex)	3.02	0.003857
L FOrb – PreCG r	Левая орбитофронтальная кора	Правая прецентральная извилина (Right Precentral Gyrus)	2.89	0.005430
L FOrb – SM Superior	Левая орбитофронтальная кора	Верхняя сенсомоторная кора (Sensorimotor Superior)	2.07	0.042754
L FOrb – PostCG l	Левая орбитофронтальная кора	Левая постцентральная извилина (Left Postcentral Gyrus)	2.06	0.044264

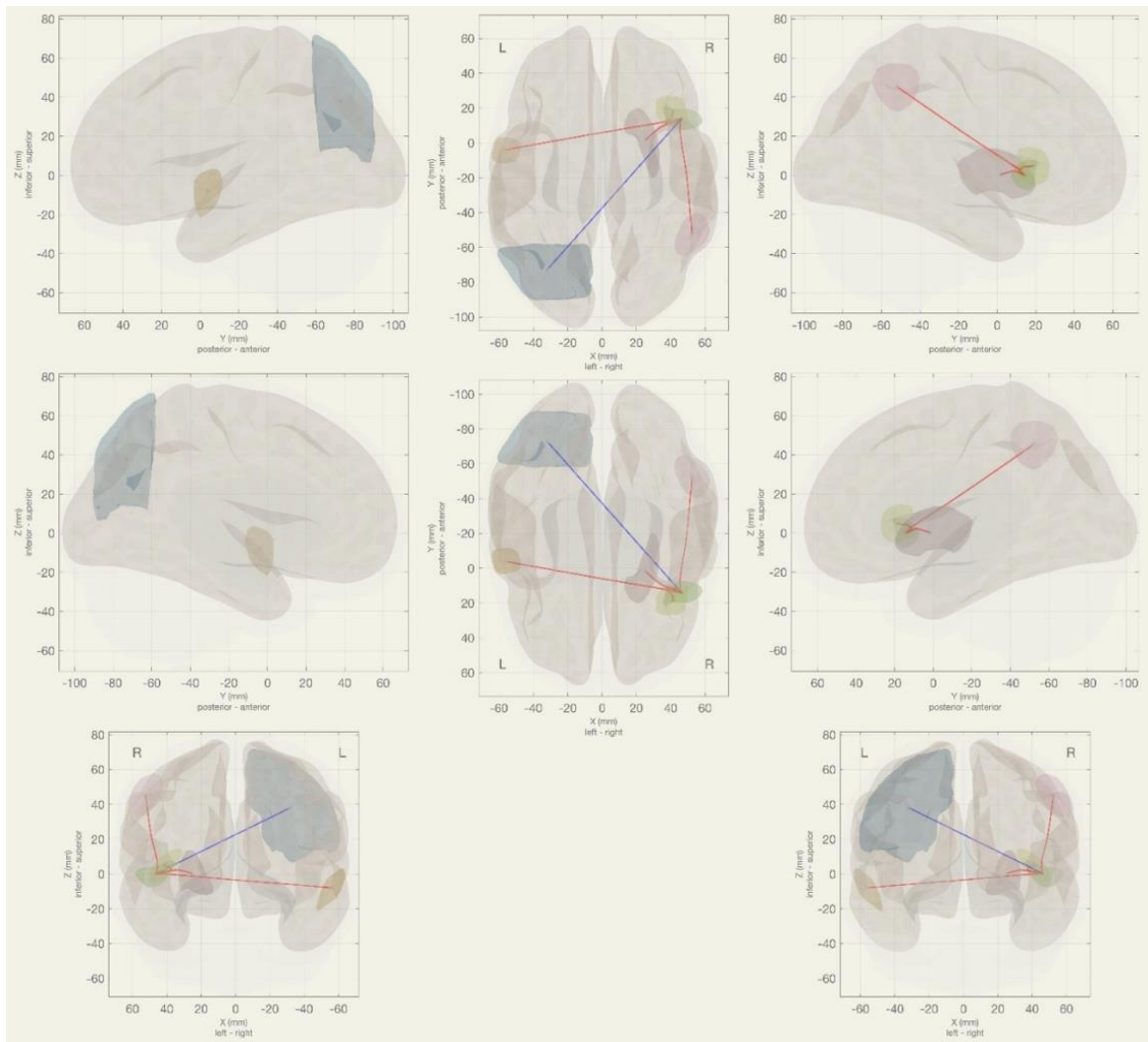


Рисунок 12 – Картограмма зон головного мозга по результатам анализа всех зон интереса (ROI) по данным сравнения двух временных точек (до и после курса) в двух сопоставимых группах: основной (программа лечения с костюмом «Reforma-ТЭКТ»)

Обобщая полученные результаты получены сводные данные о наиболее значимых функциональных изменениях в различных сетях и регионах мозга с точки зрения неврологической симптоматики (Таблица 15, Рисунок 12-13).

Таблица 15 – Сводная характеристика наиболее значимых изменений функциональной связности

Сеть / Регион 1	Сеть / Регион 2	Направление изменения	Статистика (Т, р-unc)	Потенциальная неврологическая интерпретация
1	2	3	4	5
Saliency Network (SN)				
R AInsula (Right Anterior Insula, SN)	R Frontal Operculum (FO)	Усиление	T(56)=2.76; p=0.007853	Улучшение интеграции сенсорной (включая проприоцептивную) и вегетативной информации
R AInsula (SN)	R Putamen (базальные ганглии)	Усиление	T(56)=2.45; p=0.017587	Усиление связи детекции значимости сигналов с моторным планированием и обучением
R AInsula (SN)	R PPC (Posterior Parietal Cortex, CEN)	Усиление	T(56)=2.41; p=0.019027	Улучшение переключения внимания с DMN на CEN (повышение готовности к действию)
R AInsula (SN)	L aSTG (anterior Superior Temporal Gyrus) (височная доля)	Усиление	T(56)=2.36; p=0.021659	Улучшение интеграции слуховой и социально-когнитивной информации
R AInsula (SN)	L sLOC (Зрительная кора)	Ослабление	T(56)=-2.15; p=0.035914	Перераспределение ресурсов сети от чисто сенсорной обработки
Подкорково-мозжечковые взаимодействия				
L Caudate (Left Caudate, базальные ганглии)	R Cereb6 (Right Cerebellum VI)	Ослабление	T(56)=-4.64; p=0.000021	Нормализация исходной гиперсвязности; оптимизация и перераспределение ролей в моторном контроле

Продолжение таблицы 15

1	2	3	4	5
L Caudate	L Cereb6 (Left Cerebellum VI)	Ослабление	T(56)=-3.59; p=0.000689	Нормализация гиперсвязности; снижение неэффективной компенсаторной синхронизации
L Caudate	R Cereb45 (Right Cerebellum IV-V)	Ослабление	T(56)=-3.49; p=0.000936	Перераспределение функций в моторных контурах; повышение эффективности взаимодействия
DMN – SN – зрительная кора				
R LP (Right Lateral Parietal, DMN)	ACC (Anterior Cingulate Cortex, SN)	Ослабление	T(56)=-2.56; p=0.013340	Улучшение баланса сетей; более эффективное подавление DMN со стороны SN
L sLOC (Left superior Lateral Occipital Cortex)	L SMA (Supplementary Motor Area)	Ослабление	T(56)=-2.36; p=0.021662	Улучшение селективности сетей в покое; снижение зрительной интерференции на моторные системы
L FOrb (Left Orbitofrontal Cortex)	R Sensorimotor Lateral cortex	Усиление	T(56)=3.39; p=0.001282	Ключевое изменение: усиление интеграции мотивации, вознаграждения и значимости с сенсомоторным контролем (преимущественно дистальные отделы)
L FOrb (Left Orbitofrontal Cortex)	R PostCG (Right Postcentral Gyrus, соматосенсорная кора)	Усиление	T(56)=3.10; p=0.003027	Улучшение интеграции мотивации с сенсорной обратной связью
L FOrb	R CO (Central Opercular Cortex, центральная покрывка)	Усиление	T(56)=3.02; p=0.003857	Интеграция мотивации с сенсорной (слуховой, вестибулярной) и моторной обработкой

Продолжение таблицы 15

1	2	3	4	5
L FOrb	R PreCG (Right Precentral Gyrus, первичная моторная кора)	Усиление	$T(56)=2.89$; $p=0.005430$	Улучшение интеграции мотивации с моторным планированием и исполнением
L FOrb	Sensorimotor Superior cortex (осевая мускулатура)	Усиление	$T(56)=2.07$; $p=0.042754$	Улучшение интеграции мотивации с контролем туловища и проксимальных отделов

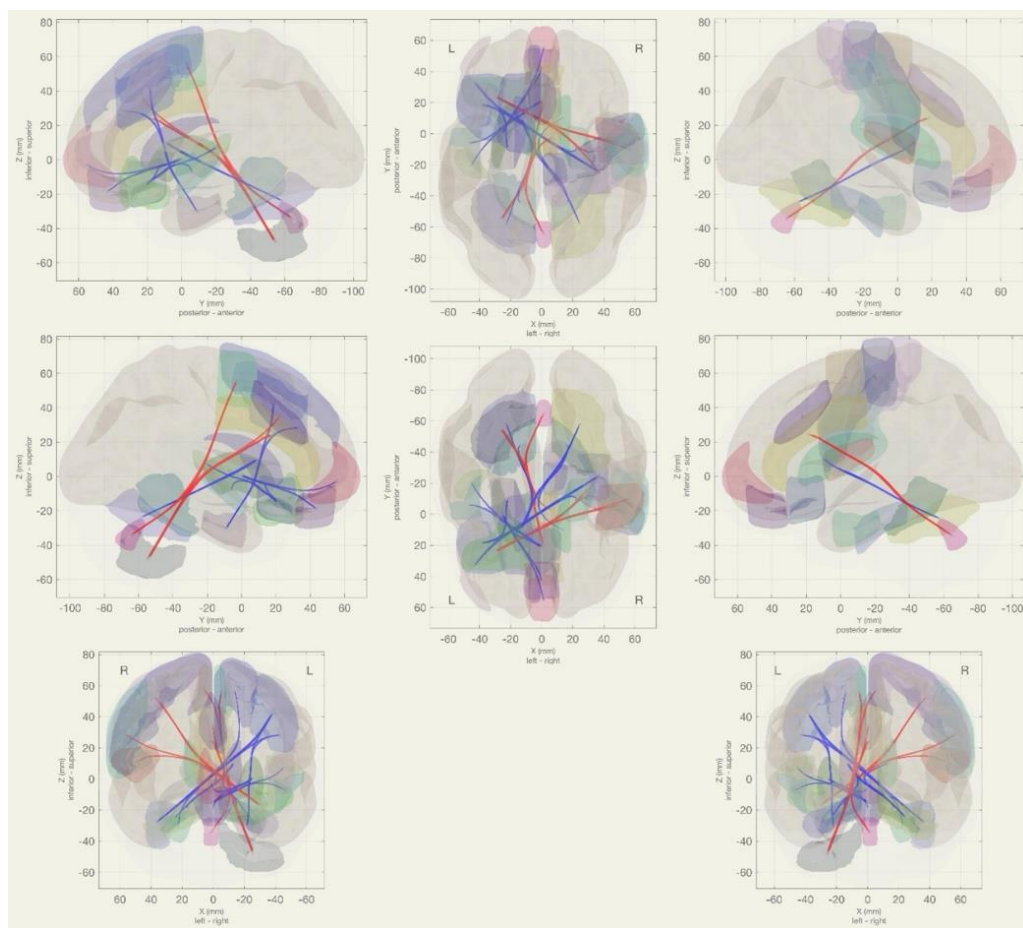


Рисунок 13 – Картограмма зон головного мозга по результатам анализа всех зон интереса (ROI) по данным сравнения двух временных точек (до и после курса) в двух сопоставимых группах: основной (программа лечения с костюмом «Reforma-ТЭКТ») и группе сравнения (программа лечения без костюма). Цветовое кодирование на представленных визуализациях соответствует степени статистической достоверности выявленных различий (с поправкой на множественные сравнения, p , FDR-скорректированные).

Совокупность полученных результатов с высокой убедительностью указывает на то, что применение технологии проприоцептивной коррекции (на основе костюма «ТЭКТ Реформа») вызывает у детей с ДЦП перестройку функциональной архитектуры мозга. Эти нейропластические сдвиги затрагивают целый ряд крупных сетей: салиентную, фронто-париетальную (исполнительную), сеть пассивного режима, сенсомоторную систему, а также подкорковые образования (базальные ганглии, таламус) и мозжечок (Рисунок 13).

3.3 Результаты диффузионной магнитно-резонансной томографии (DTI)

На рисунке 14 отображены те проводящие тракты, где после окончания лечебного курса зафиксировано достоверное увеличение фракционной анизотропии.

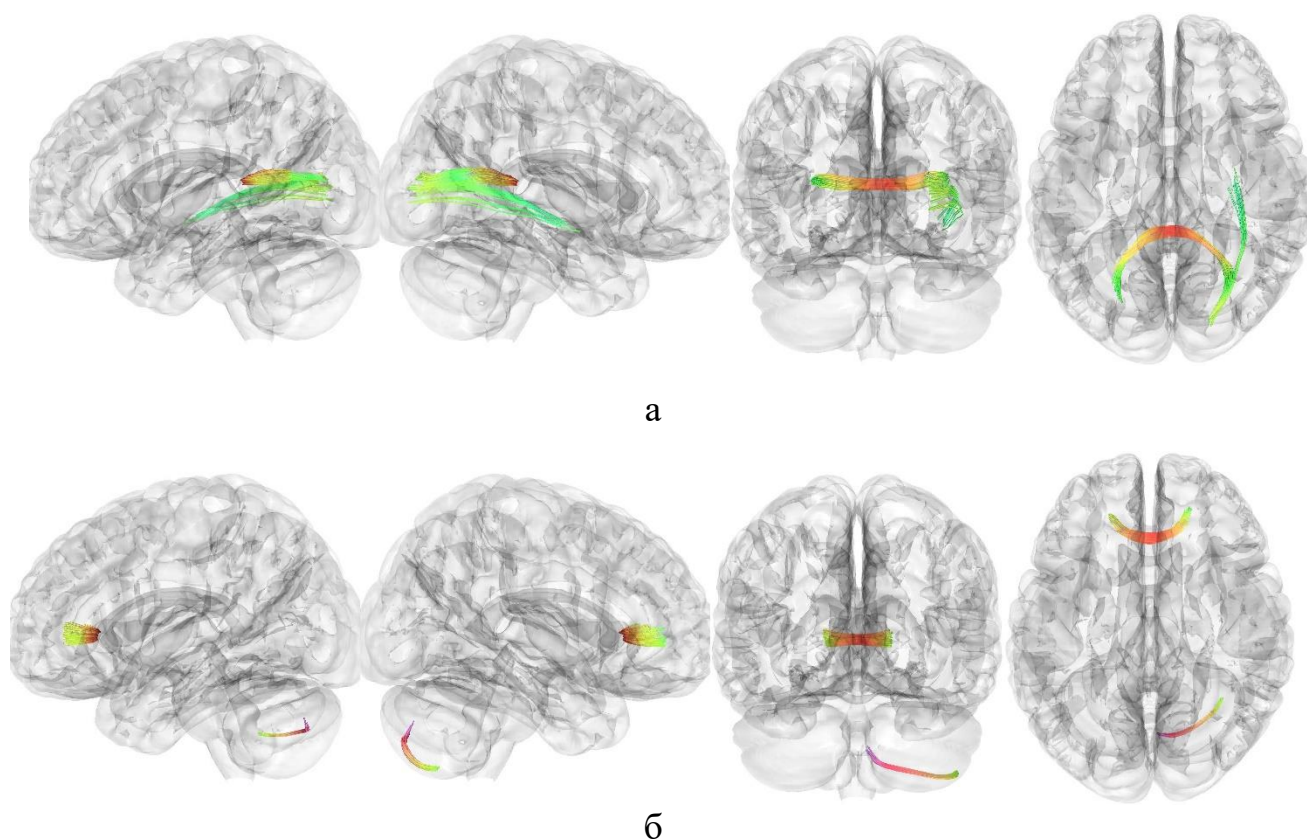


Рисунок 14. Тракты с более высоким значением фракционной анизотропии (FA) после курса лечения ($p \leq 0,01$) по данным сравнения двух временных точек (до и после курса) в двух сопоставимых группах: основной (программа лечения с костюмом «Reforma-ТЭКТ») и группы сравнения (программа лечения без костюма)

Зарегистрированный рост показателей ФА говорит об улучшении микроструктуры белого вещества и, как следствие, о более эффективном проведении нервных сигналов в ряде значимых путей. Так, в левом полушарии мозжечка увеличение анизотропии отражает усиление как внутренних связей внутри самого мозжечка, так и его связей с другими отделами ЦНС. С нашей точки зрения, это может лежать в основе более точной координации движений, особенно при выполнении сложных двигательных актов, и напрямую соотносится с наблюдаемым прогрессом моторного контроля.

Повышение ФА в области колена и валика мозолистого тела свидетельствует об укреплении межполушарного взаимодействия - между лобными долями, с одной стороны, и теменно-затылочными областями, с другой. Именно такая динамика создаёт предпосылки для быстрого и слаженного обмена информацией между полушариями, что критически важно для освоения новых двигательных навыков и планирования последовательных движений.

Кроме того, рост анизотропии в нижнем продольном пучке, который связывает затылочные и височные зоны, позволяет предположить улучшенную интеграцию зрительных сигналов с высшими когнитивными и сенсомоторными центрами. Вероятно, это соответствует переходу от преимущественно визуального контроля движений к более осмысленной, опосредованной опытом регуляции, когда зрительная информация начинает использоваться не просто как ориентир, а как полноценный компонент целенаправленной деятельности.

Выявленные изменения в структуре основных ассоциативных и комиссуральных проводящих путей формируют морфологическую основу для наблюдаемой функциональной реорганизации мозговых сетей, вовлечённых в процессы внимания, моторного контроля и сенсорной интеграции.

В целом отмечается сдвиг от компенсаторной гиперсвязанности к более дифференцированной и управляемой сетевой организации: происходит нормализация активности сети пассивного режима, повышается эффективность переключения при участии сети значимости, уменьшается избыточное влияние

зрительной коры на моторные контуры и усиливается вклад орбитофронтальных механизмов в процессы обучения и контроля движений.

Связь выявленных изменений с применением костюма «Reforma-ТЭКТ» может быть объяснена его ролью как источника направленной соматосенсорной модуляции. Эластические элементы конструкции усиливают поток проприоцептивной афферентации, повышая вовлечённость сенсомоторных и инсулярных областей. Одновременно нормализация мышечного тонуса приводит к снижению избыточного афферентного потока от гиперактивных мышц, уменьшая перегрузку подкорковых контуров и чрезмерную связанность с участием базальных ганглиев и мозжечка. Дополнительная механическая стабилизация суставов снижает уровень кинестетического шума, облегчает работу сети значимости и способствует перераспределению функциональных ресурсов в пользу исполнительных и сенсомоторных систем, ускоряя формирование более устойчивых и экономичных двигательных программ.

На физиологическом уровне это проявляется улучшением процессов сенсорной интеграции, снижением выраженности спастичности и усилением кортикального контроля над движениями. На поведенческом уровне наблюдаются повышение точности, устойчивости и обучаемости моторных навыков. В совокупности данные изменения соответствуют нейропластическим процессам, индуцированным усиленной проприоцептивной стимуляцией и коррекцией постурального контроля.

Таким образом, после курса лечения в основной группе выявлены статистически значимые изменения функциональной коннективности, включающие усиление связей правой передней островковой доли с фронто-париетальными и подкорковыми структурами, ослабление гиперсвязанности в подкорково-мозжечковых контурах, оптимизацию взаимодействия между сетями пассивного режима работы мозга, салиентной сетью и зрительной корой, а также усиление интеграции орбитофронтальной коры с сенсомоторными регионами.

По данным DTI отмечено повышение фракционной анизотропии в ряде ассоциативных и комиссуральных трактов. Выявленные сдвиги согласуются с

улучшением микроструктурной организации белого вещества и наблюдаемой клинической динамикой.

3.4 Результаты клинико-неврологического обследования

Клинико-неврологическое обследование проводилось у пациентов основной группы (n=95) и группы сравнения (n=83) до начала наблюдения (T0) и через 1 месяц после его завершения (T1). Исследование включало оценку уровня двигательных нарушений по шкале GMFCS, постурального контроля по шкале SATCo, способности удержания позы сидя по шкале Hare/Hallet, мануальных функций по шкале MACS, выраженности спастического синдрома по модифицированной шкале Ashworth, объёма движений в суставах нижних конечностей по данным гониометрии, а также коммуникативного функционирования по шкале CFCS.

Шкалы GMFCS и CFCS использовались преимущественно для характеристики исходного функционального статуса пациентов и оценки сопоставимости исследуемых групп. Существенных изменений распределения пациентов по уровням GMFCS и CFCS в течение периода наблюдения не зарегистрировано, что соответствует особенностям данных классификационных систем и ожидаемому характеру течения заболевания в рассматриваемом временном интервале.

Исходно группы были сопоставимы по возрасту, полу, уровню двигательных нарушений и основным клинико-неврологическим характеристикам ($p>0,05$).

С позиции неврологии выявленные нарушения были представлены несколькими взаимосвязанными синдромокомплексами, включавшими спастический синдром, нарушения постурального контроля, двигательную недостаточность нижних конечностей и нарушения мануальных функций. Анализ результатов проводился с учётом динамики указанных компонентов

неврологического дефицита.

Общая характеристика клинической динамики

Результаты сравнительной оценки основных клинико-неврологических показателей представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Динамика клинико-функциональных показателей у пациентов основной группы и группы сравнения

Показатель	Основная группа Т0, М±SD	Основная группа Т1, М±SD	Δ	Группа сравнения Т0, М±SD	Группа сравнения Т1, М±SD	Δ
SATCo, баллы	4,0±1,0	6,3±0,9	+2,3	4,1±1,1	4,7±1,0	+0,6
MACS, уровень	3,1±0,6	2,8±0,5	-0,3	3,0±0,5	3,0±0,5	0
Ashworth Scale (верхние конечности), баллы	2,5±0,3	2,1±0,2	-0,4	2,4±0,3	2,3±0,3	-0,1
Ashworth Scale (нижние конечности), баллы	3,2±0,4	2,2±0,3	-1,0	3,1±0,4	2,8±0,4	-0,3
Тыльное сгибание ГС при согнутом КС, °	7,1±4,3	11,6±4,7	+4,5	7,0±4,0	8,2±4,1	+1,2
Тыльное сгибание ГС при разогнутом КС, °	4,9±3,8	8,5±4,0	+3,6	5,0±3,7	5,9±3,8	+0,9
Отведение в ТБС при согнутом КС, °	24,5±5,8	31,8±5,4	+7,3	24,0±5,7	26,5±5,5	+2,5
Отведение в ТБС при разогнутом КС, °	19,2±5,1	25,4±4,8	+6,2	19,0±5,0	21,3±4,9	+2,3
Сгибание в КС, °	103,4±9,1	109,8±8,2	+6,4	103,0±8,8	105,0±8,7	+2,0
Разгибание в КС, °	-8,2±4,0	-4,3±3,1	+3,9	-8,0±3,9	-6,8±3,6	+1,2
Примечание: Т0 — исходное обследование; Т1 — обследование через 1 месяц; Δ — изменение показателя относительно исходного уровня; ГС — голеностопный сустав; КС — коленный сустав; ТБС — тазобедренный сустав.						

Исходно статистически значимых различий между основной группой и группой сравнения по исследуемым клинико-неврологическим показателям не выявлено ($p>0,05$).

По результатам контрольного обследования в обеих группах зарегистрирована положительная динамика отдельных показателей

неврологического статуса. Вместе с тем выраженность изменений существенно различалась.

Наиболее значимые изменения наблюдались у пациентов основной группы и касались постурального контроля, выраженности спастического синдрома нижних конечностей и показателей подвижности тазобедренных и голеностопных суставов.

У пациентов группы сравнения также отмечалась положительная динамика двигательного статуса, однако степень изменений была менее выраженной практически по всем исследуемым параметрам.

Полученные данные свидетельствуют о различной степени выраженности клинико-неврологической динамики в исследуемых группах и послужили основанием для последующего анализа отдельных компонентов двигательного дефицита.

Динамика постурального контроля

Наиболее выраженные изменения среди исследуемых клинико-неврологических показателей зарегистрированы при оценке постурального контроля по шкале SATCo.

В основной группе среднее значение SATCo увеличилось с $4,0 \pm 1,0$ до $6,3 \pm 0,9$ балла. В группе сравнения данный показатель изменился с $4,1 \pm 1,1$ до $4,7 \pm 1,0$ балла.

Постуральный контроль представляет собой один из базовых компонентов двигательного функционирования и обеспечивает возможность поддержания положения тела в пространстве, сохранения равновесия и выполнения целенаправленных двигательных действий. При спастической диплегии нарушение постуральной регуляции относится к числу ведущих проявлений двигательного дефицита и нередко определяет уровень функциональной независимости пациента.

Когда туловище недостаточно стабилизировано, это серьезно мешает ребёнку осваивать более сложные движения. В первую очередь страдают ходьба (особенно самостоятельная), умение удерживать равновесие при смене позы и

точность движений рук. По сути, нарушения постурального контроля сказываются на всех без исключения аспектах двигательной активности — это трудно переоценить.

С неврологической точки зрения, причины такой недостаточности не сводятся лишь к поражению проводящих моторных путей. Здесь важен и сбой в обработке сенсорных сигналов, и разлаженная координация, и общий сбой в управлении движениями. В итоге ребёнок вынужденно вырабатывает компенсаторные приёмы, которые хоть и помогают как-то действовать, но делают это неэффективно и крайне энергозатратно.

Для более детальной оценки мы дополнительно применили шкалу Hare/Hallet. Данные, полученные по ней, показали ту же динамику, что и в основных тестах, и убедительно подтвердили: способность пациентов удерживать тело в пространстве действительно улучшилась.

Положительная динамика показателей SATCo зарегистрирована у всех обследованных пациентов основной группы. Полученные результаты свидетельствуют о высокой чувствительности показателей постурального контроля к изменениям неврологического статуса у пациентов со спастической диплегией. Улучшение способности поддерживать стабильное положение тела является одним из наиболее ранних проявлений положительной клинико-неврологической динамики и создаёт предпосылки для последующего совершенствования более сложных двигательных навыков.

У пациентов основной группы положительная динамика показателей постурального контроля носила более выраженный характер по сравнению с группой сравнения, что свидетельствует о большей степени регресса нарушений центральных механизмов поддержания позы и равновесия.

Таким образом, нарушения постурального контроля являются одним из ключевых компонентов неврологического дефицита при спастической диплегии и характеризуются высокой чувствительностью к изменениям функционального состояния центральной нервной системы.

Динамика мышечного тонуса

Оценка выраженности спастического синдрома проводилась отдельно для верхних и нижних конечностей с использованием модифицированной шкалы Ashworth.

Наиболее выраженные изменения зарегистрированы в нижних конечностях. В основной группе показатель Ashworth снизился с $3,2 \pm 0,4$ до $2,2 \pm 0,3$ балла, тогда как в группе сравнения — с $3,1 \pm 0,4$ до $2,8 \pm 0,4$ балла.

В верхних конечностях уменьшение выраженности спастичности также было более выраженным в основной группе (с $2,5 \pm 0,3$ до $2,1 \pm 0,2$ балла) по сравнению с группой сравнения (с $2,4 \pm 0,3$ до $2,3 \pm 0,3$ балла).

Спастический синдром является одним из ведущих неврологических синдромов при детском церебральном параличе. Его развитие связано с нарушением супраспинального контроля сегментарного рефлекторного аппарата спинного мозга и сопровождается повышением возбудимости рефлексов растяжения. Именно данный механизм во многом определяет формирование патологических двигательных паттернов у пациентов со спастической диплегией.

Для данной формы детского церебрального паралича наиболее характерно преобладание спастичности в нижних конечностях. Повышение тонуса приводящих мышц бедра, сгибателей коленных суставов и подошвенных сгибателей стоп ограничивает двигательную активность, нарушает биомеханику ходьбы и снижает устойчивость при вертикализации.

Длительное существование спастического синдрома способствует развитию вторичных изменений опорно-двигательного аппарата, включая формирование контрактур, деформаций конечностей и стойких нарушений походки. Степень спастичности, как известно, служит одним из главных неврологических критериев, по которым мы судим о глубине двигательного дефицита. Когда мы проанализировали, у кого из пациентов наступил клинический ответ, оказалось, что тонус в нижних конечностях снизился абсолютно у всех участников основной группы. А вот с верхними конечностями картина иная - положительная динамика наблюдалась только в 72 % случаев. Эти цифры говорят о том, что нарушения мышечного тонуса в ногах, являющихся опорой при спастической диплегии,

поддаются коррекции быстрее и заметнее. И что характерно, как только спастика в ногах уменьшалась, сразу расширялся объём движений в суставах, а нефизиологические двигательные стереотипы становились менее грубыми. Такая параллель ещё раз доказывает, что спастичность напрямую влияет на работу всей двигательной системы.

Снижение выраженности спастичности верхних конечностей также имело важное клиническое значение, поскольку способствовало улучшению точности движений кисти и расширению функциональных возможностей верхних конечностей. У пациентов группы сравнения также наблюдалась положительная динамика показателей мышечного тонуса, однако её выраженность была существенно ниже, чем в основной группе. Полученные данные позволяют рассматривать регресс спастического синдрома как один из ведущих компонентов положительной клинико-неврологической динамики у пациентов со спастической диплегией.

Оценка мануальных функций проводилась с использованием классификационной системы MACS (Manual Ability Classification System).

В основной группе средний показатель MACS изменился с $3,1 \pm 0,6$ до $2,8 \pm 0,5$ уровня, тогда как в группе сравнения существенной динамики не зарегистрировано ($3,0 \pm 0,5$ и $3,0 \pm 0,5$ соответственно).

Несмотря на то что спастическая диплегия преимущественно характеризуется поражением нижних конечностей, нарушения функции верхних конечностей также являются важным компонентом неврологического дефицита. Ограничение мануальных возможностей оказывает непосредственное влияние на уровень бытовой независимости пациента, способность к самообслуживанию и успешность социальной адаптации.

При ДЦП проблемы с работой рук возникают из-за целого комплекса патофизиологических сдвигов: сбоя произвольного моторного контроля, нарушений мышечного тонуса, падения точности и расстройств обработки сенсорных сигналов. Из-за этого детям трудно даются действия, где нужна слаженная работа кисти и пальцев.

Для школьников состояние мануальных функций особенно важно. Если кисть функционирует плохо, ребёнок испытывает серьёзные сложности с письмом, рисованием и другими учебными навыками, основанными на мелкой моторике. Нередко именно нарушения работы рук становятся ведущей причиной, ограничивающей повседневную активность пациента.

В основной группе мы зафиксировали положительную динамику по шкале MACS дети стали значительно лучше пользоваться руками. В группе сравнения заметных сдвигов не произошло.

Нужно понимать, что восстановление тонких движений кисти гораздо более сложный нейрофизиологический процесс, чем простое снижение спастичности или увеличение подвижности крупных суставов. Чтобы сформировать стойкие мануальные навыки, организму требуется задействовать механизмы планирования движений, двигательного обучения и правильной сенсорной обработки.

Поэтому то, что улучшения по MACS оказались не такими выраженными, как по постуральному контролю или мышечному тону, вполне закономерно. Это отражает особенности восстановления функций рук именно при спастической диплегии.

В целом, нарастание мануальных возможностей важная составляющая общей положительной неврологической динамики, которая говорит о расширении функциональных способностей детей.

Гониометрию мы использовали для точной количественной оценки того, насколько ограничена подвижность суставов ног, и чтобы проследить эти показатели в динамике.

Самые заметные изменения были зарегистрированы по отведению в тазобедренных суставах. В основной группе при согнутом колене отведение выросло с $24,5 \pm 5,8^\circ$ до $31,8 \pm 5,4^\circ$, тогда как в группе сравнения лишь с $24,0 \pm 5,7^\circ$ до $26,5 \pm 5,5^\circ$. Такая же закономерность проявилась и при оценке отведения бедра с разогнутым коленом.

Положительная динамика коснулась и тыльного сгибания стопы, и объёма

движений в коленных суставах, причём в основной группе изменения были более значительными, чем в группе сравнения. Ограниченная подвижность суставов один из самых характерных признаков двигательной недостаточности при спастической диплегии. Её вызывают сразу несколько факторов: спастический синдром, мышечный дисбаланс, вторичные контрактуры и общие структурно-функциональные нарушения опорно-двигательной системы.

Особо значимо ограничение отведения бедра, поскольку этот показатель тесно связан с формированием патологических двигательных стереотипов. Когда бедро отводится плохо, у ребёнка развивается перекрёстный паттерн ходьбы, страдает устойчивость в вертикальном положении и в целом снижается эффективность передвижения.

Не меньшее значение имеет и объём тыльного сгибания стопы. Ограничение данного движения приводит к нарушению фазового рисунка ходьбы, ухудшению опорной функции стопы и формированию эквинусной установки. В свою очередь это сопровождается увеличением энергозатрат при передвижении и снижением функциональной мобильности пациента.

Подвижность коленных суставов также имеет существенное значение для реализации локомоторной функции. Ограничение движений в коленных суставах способствует нарушению биомеханики ходьбы и снижению эффективности двигательной активности.

По данным анализа частоты положительного ответа увеличение объёма тыльного сгибания в голеностопных суставах зарегистрировано у 71 (75%) пациента основной группы и у 31% пациентов группы сравнения. Улучшение отведения в тазобедренных суставах отмечено у 95 (100%) пациентов основной группы и у 39% пациентов группы сравнения. Увеличение объёма движений в коленных суставах зарегистрировано у 60 (63%) обследованных основной группы и у 24% пациентов группы сравнения.

Выявленные изменения отражают повышение подвижности крупных суставов нижних конечностей и могут рассматриваться как функциональное проявление уменьшения выраженности спастичности и улучшения двигательного

контроля.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что положительная динамика объёма движений являлась одним из существенных компонентов улучшения двигательного статуса пациентов и сопровождалась уменьшением выраженности функциональных ограничений.

Более выраженные изменения гониометрических показателей в основной группе указывают на большую степень регресса двигательных нарушений и вторичных биомеханических ограничений.

Таким образом, увеличение объёма движений в суставах нижних конечностей отражает положительную динамику двигательной функции и является важным объективным показателем изменения неврологического статуса пациентов со спастической диплегией.

Анализ частоты положительного клинического ответа

Для дополнительной характеристики клинико-неврологической динамики проведён анализ частоты положительного клинического ответа по отдельным показателям двигательного функционирования.

Таблица 17 – Частота положительного клинического ответа в исследуемых группах

Показатель	Основная группа n (%)	Группа сравнения n (%)
SATCo	95 (100%)	48 (58%)
MACS	53 (56%)	12 (15%)
Ashworth BK	68 (72%)	22 (26%)
Ashworth HK	95 (100%)	35 (42%)
Тыльное сгибание ГС	71 (75%)	26 (31%)
Отведение ТБС	95 (100%)	32 (39%)
Сгибание/разгибание КС	60 (63%)	20 (24%)

Анализ частоты положительного ответа позволил оценить неоднородность динамики различных компонентов неврологического дефицита.

Наиболее высокая частота положительных изменений зарегистрирована по показателям пострурального контроля, выраженности спастического синдрома нижних конечностей и объёму отведения в тазобедренных суставах. Улучшение данных параметров отмечено у всех пациентов основной группы.

Полученные результаты позволяют предположить, что именно нарушения постурального контроля и спастический синдром относятся к наиболее динамичным компонентам неврологического дефицита при спастической диплегии. В то же время функции верхних конечностей характеризуются более медленным темпом восстановления.

Следует отметить, что частота положительного ответа по шкале MACS оказалась ниже по сравнению с другими показателями. Вероятно, это связано с более сложной нейрофизиологической организацией произвольных движений кисти и необходимостью более длительного периода для формирования устойчивых функциональных изменений.

Во всех анализируемых категориях частота положительного ответа была выше в основной группе по сравнению с группой сравнения (таб. 17). Наиболее выраженные различия зарегистрированы по показателям SATCo, Ashworth нижних конечностей и объёму отведения в тазобедренных суставах.

Таким образом, результаты клинико-неврологического обследования продемонстрировали положительную динамику основных компонентов неврологического дефицита у пациентов со спастической диплегией, включая нарушения постурального контроля, спастический синдром, ограничение объёма движений и мануальную дисфункцию. Наиболее выраженные изменения зарегистрированы в отношении постуральной регуляции, мышечного тонуса нижних конечностей и подвижности тазобедренных суставов.

Полученные клинические данные в дальнейшем сопоставлялись с результатами мультимодальной магнитно-резонансной томографии для оценки взаимосвязи клинико-неврологической динамики и процессов структурно-функциональной перестройки головного мозга. Это позволило провести комплексную оценку нейропластических изменений у пациентов со спастической диплегией и определить возможные механизмы формирования положительной клинической динамики.

Для иллюстрации выявленных закономерностей ниже приведено клиническое наблюдение пациента со спастической диплегией,

демонстрирующее характерные изменения клинико-неврологических и нейровизуализационных показателей в процессе наблюдения.

Клинический пример

Пациент К., 9 лет. Диагноз: детский церебральный паралич, спастическая диплегия, поздняя резидуальная стадия. Уровень двигательных нарушений по шкале GMFCS — III. Пациент проходил курс комплексного лечения с применением нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ».

При первичном клинико-неврологическом обследовании отмечались выраженные нарушения постурального контроля, спастический синдром преимущественно в нижних конечностях, ограничение объёма движений в тазобедренных и голеностопных суставах, нарушение устойчивости при вертикализации и ходьбе.

До старта терапии возможности самостоятельного передвижения были сильно ограничены. Пациент мог пройти лишь небольшое расстояние, и любая попытка ходьбы сопровождалась заметными компенсаторными движениями, которые помогали удерживать равновесие. Исходные баллы по шкале SATCo составляли 4, по Эшворту для ног 3, для рук 2. По классификации MACS функциональные возможности ребёнка оценивались на уровне III. В тазобедренных суставах отведение не превышало 22° , а тыльное сгибание стопы достигало всего 6° . После курса лечения мы увидели явное улучшение неврологической картины. Показатель SATCo поднялся до 6, это отразилось на том, что пациент стал лучше контролировать положение корпуса и увереннее выполнял двигательные пробы. Спастичность в ногах снизилась до 2 баллов по шкале Эшворта. Отведение в тазобедренных суставах увеличилось до 31° , а тыльное сгибание стопы до 11° .

В процессе наблюдения стало заметно, что походка стала устойчивее, компенсаторные движения туловища почти не проявлялись, и пациент уже мог сохранять вертикальную позу без опоры. Также улучшилось использование рук в повседневных делах и при письме, движения стали более целенаправленными и точными.

При повторной мультимодальной МРТ обнаружались признаки перестройки мозговых связей: усилилась функциональная связность в салиентной сети, а в некоторых путях белого вещества повысилась фракционная анизотропия. Эти изменения хорошо коррелировали с клиническим улучшением и, по всей видимости, отражали активные нейропластические процессы.

Таким образом, описанный случай показывает, как позитивные сдвиги в неврологическом статусе сочетаются с перестройкой структурно-функциональных связей головного мозга, которую удалось зафиксировать с помощью мультимодальной МРТ.

Помимо клинических данных, мы оценили изменения в базовых учебных умениях зрительно-пространственном восприятии, чтении и графомоторных навыках. Сравнение результатов до и после лечения приведено в таблице 18.

Таблица 18 – Динамика базовых учебных навыков

Показатель	Группа	До (T0)	После (T1)	Δ (%)
Зрительно-пространственное восприятие	Сравнения	30	35	+5
Зрительно-пространственное восприятие	Основная	32	39	+7
Чтение	Сравнения	50	67	+17
Чтение	Основная	44	69	+25
Графомоторные навыки	Сравнения	35	43	+8
Графомоторные навыки	Основная	31	47	+16

Сравнивая результаты двух групп, можно заметить, что в основной группе положительные сдвиги оказались заметнее особенно по таким показателям, как чтение и графомоторные навыки. Скорее всего, это связано с тем, что у этих детей улучшился сенсомоторный контроль, а значит, и выполнение учебных заданий стало даваться им легче. Полученные данные позволяют предположить, что терапевтическое воздействие повлияло именно на те функциональные звенья, которые непосредственно задействованы в обучении.

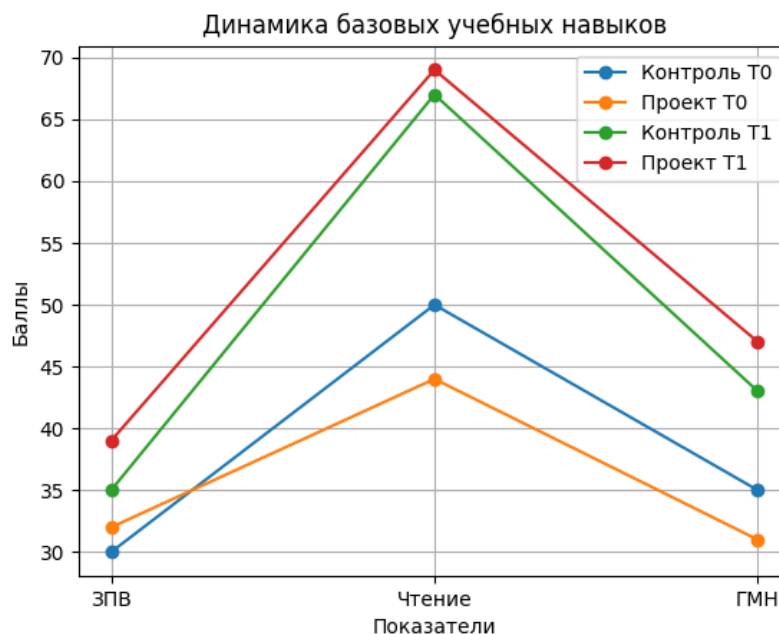


Рисунок 15 – Динамика базовых учебных навыков (ЗПВ, чтение, ГМН) у пациентов основной группы и группы сравнения до (T0) и после (T1) курса лечения

Если посмотреть на рисунок 15, видно, что в основной группе самые заметные сдвиги пришлись на чтение. Там прибавка составила 25%, и на графомоторные навыки, плюс 16%. В группе сравнения эти же показатели выросли меньше: 17% и 8% соответственно. Что касается зрительно-пространственного восприятия, то улучшения отмечались в обеих группах, но они были не такими ярко выраженными, как по первым двум пунктам. Полученные результаты свидетельствуют о том, что положительная динамика на фоне лечения сопровождалась улучшением не только двигательных функций, но и отдельных навыков, связанных с сенсомоторной интеграцией и учебной деятельностью.

Таким образом, клинико-неврологическое обследование показало статистически значимое улучшение моторных функций, постурального контроля, мышечного тонуса, мануальных навыков и объёма движений после курса лечения. Дополнительно выявлена положительная динамика отдельных базовых учебных навыков, преимущественно чтения и графомоторных функций. Полученные результаты послужили основанием для дальнейшего сопоставления клинической динамики с нейровизуализационными показателями структурной и функциональной организации головного мозга.

3.5 Интегральный анализ клинико-нейровизуализационных данных

Сопоставление клинико-функциональных и нейровизуализационных данных показало их согласованную направленность, что позволяет рассматривать выявленные изменения как взаимосвязанные проявления структурно-функциональной перестройки головного мозга на фоне лечения.

Для количественной оценки взаимосвязей между клинической динамикой и параметрами мультимодальной МРТ выполнен корреляционный анализ.

Поскольку часть исследуемых показателей имела порядковый характер и могла не соответствовать нормальному распределению, использовали непараметрический коэффициент ранговой корреляции Спирмена (ρ). Анализ проводился в основной группе пациентов ($n=95$), получавших комплексное лечение с применением нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ». В качестве клинических переменных использовали динамику показателей SATCo, Ashworth Scale, MACS и параметров гониометрии между временными точками T0 и T1. В качестве нейровизуализационных переменных анализировали изменения функциональной коннективности по данным фМРТ покоя и показатели фракционной анизотропии (FA) по данным диффузионной МРТ.

Для контроля риска ложноположительных результатов при множественных сопоставлениях применяли коррекцию методом FDR. Статистически значимыми считали взаимосвязи при $p < 0,05$ после коррекции.

В таблице 19 представлены наиболее значимые корреляционные связи между динамикой клинических шкал и параметрами структурно-функциональной организации головного мозга.

Таблица 19 – Корреляционный анализ взаимосвязи клинико-функциональных и нейровизуализационных показателей после курса лечения

Клинический показатель	Нейровизуализационный параметр	ρ Спирмена	p-FDR	Интерпретация
1	2	3	4	5
Постуральный контроль				
SATCo (↑)	Усиление мозжечково-корковой связности	0,58	0,007	Улучшение постурального контроля связано с повышением эффективности механизмов сенсомоторной интеграции
SATCo (↑)	Усиление связности между мозжечком и сенсомоторной корой	0,60	0,005	Повышение устойчивости, сегментарного контроля туловища и стабилизации положения тела
SATCo (↑)	Усиление функциональной связности M1–SMA	0,56	0,009	Улучшение постурального контроля сопровождается повышением эффективности моторного планирования
Способность удержания позы сидя				
Hare/Hallet (↑)	Усиление связности между мозжечком и дополнительной моторной областью	0,54	0,012	Улучшение способности удержания позы сидя связано с повышением эффективности постуральной регуляции
Hare/Hallet (↑)	Усиление сенсомоторной интеграции	0,51	0,017	Повышение устойчивости туловища сопровождается функциональной перестройкой моторных сетей
Спаستичность				
Ashworth Scale нижних конечностей (↓)	Ослабление функциональной связности между хвостатым ядром и мозжечком	–0,66	0,002	Снижение патологической гиперсинхронизации моторных контуров сопровождается уменьшением выраженности спастики
Ashworth Scale верхних конечностей (↓)	Повышение FA комиссуральных и кортикоспинальных трактов	–0,49	0,021	Улучшение проводимости белого вещества сопровождается снижением мышечного тонуса

Продолжение таблицы 19

1	2	3	4	5
Ashworth Scale нижних конечностей (↓)	Повышение FA ассоциативных проводящих путей	−0,55	0,010	Снижение выраженности спастичности связано с микроструктурной нейропластичностью
Мануальные функции				
MACS (↓)	Повышение FA мозолистого тела	−0,52	0,015	Улучшение межполушарной интеграции сопровождается улучшением мануальных функций
MACS (↓)	Усиление функциональной связности сенсомоторной сети	−0,50	0,019	Улучшение использования верхних конечностей связано с перестройкой моторных взаимодействий
Объём движений и функциональная мобильность				
Тыльное сгибание ГС (↑)	Усиление интеграции сенсомоторной сети	0,55	0,010	Увеличение объёма движений сопровождается улучшением двигательной координации
Отведение ТБС (↑)	Усиление функциональной связности сенсомоторных регионов	0,53	0,013	Повышение функциональной мобильности сопровождается улучшением двигательного контроля
Сгибание/разгиб ание КС (↑)	Усиление интеграции сенсомоторной сети	0,50	0,018	Улучшение биомеханики движений связано с перестройкой моторных сетей
Тыльное сгибание ГС (↑)	Повышение FA ассоциативных трактов	0,53	0,013	Улучшение подвижности связано со структурной нейропластичностью белого вещества
Двигательное развитие				
GMFCS (↓)	Усиление интеграции сенсомоторной сети	−0,47	0,026	Снижение выраженности двигательных ограничений сопровождается функциональной перестройкой моторных сетей

Продолжение таблицы 19

1	2	3	4	5
Коммуникативные функции				
CFCS (↓)	Ослабление влияния DMN и повышение эффективности межсетевого взаимодействия	−0,46	0,028	Улучшение коммуникативного функционирования сопровождается повышением эффективности когнитивного контроля
Когнитивно-моторные функции				
Когнитивные показатели (чтение, графомоторные навыки, зрительно-пространственное восприятие) (↑)	Ослабление влияния сети пассивного режима работы мозга (DMN), повышение эффективности межсетевого взаимодействия	−0,48	0,024	Повышение целенаправленной активности и когнитивного контроля
Примечание: ↑ — увеличение показателя после лечения; ↓ — снижение показателя после лечения (отражает положительную динамику для шкал, где уменьшение соответствует улучшению состояния); FA — фракционная анизотропия; M1 — первичная моторная кора; SMA — дополнительная моторная область; DMN — сеть пассивного режима работы мозга				

По данным корреляционного анализа (Таблица 19), улучшение пострурального контроля по шкале SATCo ассоциировалось с реорганизацией взаимодействия между сенсомоторной сетью, мозжечком, салиентной сетью (SN) и сетью пассивного режима работы мозга (DMN), что отражает повышение эффективности координации и регуляции двигательной активности. Одновременно наблюдалось снижение избыточной функциональной сопряженности между сетью пассивного режима работы мозга и сенсомоторной сетью, что может интерпретироваться как переход от преобладания фоновой активности к более целенаправленной моторной деятельности и соответствует клиническому улучшению концентрации на выполнении двигательных задач.

Снижение выраженности спастичности по шкале Ashworth сопровождалось изменениями параметров функциональной и структурной организации головного мозга. Уменьшение мышечного тонуса нижних конечностей сочеталось с ослаблением функциональной связности между хвостатым ядром и мозжечком, что

может отражать снижение патологической гиперсинхронизации в подкорково-мозжечковых моторных контурах. Одновременно улучшение показателей Ashworth ассоциировалось с повышением фракционной анизотропии (FA) по данным диффузионной МРТ в кортикоспинальных, комиссуральных и ассоциативных проводящих путях, включая мозолистое тело, что свидетельствует о микроструктурной перестройке белого вещества и потенциальном улучшении эффективности проведения нейронных сигналов.

Положительная динамика мануальных функций по шкале MACS сопровождалась изменениями межполушарного взаимодействия и усилением функциональной интеграции сенсомоторных сетей. Обнаруженные нами связи, скорее всего, указывают на две вещи: контроль движений рук становится более эффективным, подключаются компенсаторные нейропластические механизмы, которые помогают лучше использовать кисти в бытовых делах.

Что касается гониометрии, мы зафиксировали чёткое увеличение амплитуды, особенно заметно это было по тыльному сгибанию в голеностопах, отведению в тазобедренных суставах и сгибанию-разгибанию в коленях. И параллельно с этим ростом подвижности мы наблюдали усиление интеграции между сенсорными и моторными областями, а также изменения в микроструктуре белого вещества. Из этого можно сделать вывод, что расширение объёма движений связано не просто со спадом спастичности, а с более фундаментальной перестройкой самих двигательных регуляторных цепочек.

Кроме того, мы обратили внимание, что избыточная функциональная связка между сетью пассивного режима (DMN) и сенсомоторной сетью стала слабее. Одновременно изменился и характер взаимодействия между салиентной сетью, мозжечком и корковыми моторными зонами.

Выявленные изменения могут интерпретироваться как переход от преобладания неэффективных компенсаторных паттернов к более адаптивной и целенаправленной организации двигательной активности, что соответствует зарегистрированной положительной клинико-функциональной динамике.

В целом полученные результаты подтверждают, что применение костюма

«Reforma-ТЭКТ» сопровождается многоуровневой нейропластической перестройкой, включающей микроструктурные изменения белого вещества, функциональную реорганизацию нейронных сетей и клинически значимое улучшение постурального контроля, мышечного тонуса, мануальных функций и объёма движений. Выявленные изменения позволяют рассматривать параметры мультимодальной магнитно-резонансной томографии как потенциальные объективные маркеры эффективности лечения у пациентов со спастической диплегией.

Таким образом, установлено, что у всех обследованных пациентов ($n=178$) по данным традиционной магнитно-резонансной томографии выявлялись хронические структурные изменения головного мозга, преимущественно в виде поражения перивентрикулярного белого вещества. Доминирующим типом поражения являлась перивентрикулярная лейкомаляция (изолированная или в сочетании с внутрижелудочковыми кровоизлияниями), выявленная у 84,9% пациентов основной группы и у 82,3% группы сравнения при отсутствии статистически значимых различий между группами ($p>0,05$).

По данным функциональной МРТ в состоянии покоя после курса лечения в основной группе, получавшей дополнительно костюм «Reforma-ТЭКТ», выявлены статистически значимые изменения функциональной коннективности. Они включали усиление связей правой передней островковой доли с фронто-париетальными и подкорковыми структурами, ослабление гиперсвязанности в подкорково-мозжечковых контурах, оптимизацию взаимодействия между сетями пассивного режима работы мозга, салиентной и зрительной корой, а также усиление интеграции левой орбитофронтальной коры с сенсомоторными регтионами.

По результатам диффузионно-тензорной томографии отмечено повышение фракционной анизотропии в ряде ассоциативных, комиссуральных и мозжечковых проводящих путей после курса лечения ($p \leq 0,01$), что отражает улучшение структурной организации белого вещества.

Выявлена положительная клинико-функциональная динамика по

большинству оцениваемых параметров. Наиболее выраженные улучшения в основной группе зарегистрированы по шкале SATCo (100%), показателям мышечного тонуса нижних конечностей по шкале Ashworth (100%), объёму отведения в тазобедренных суставах (100%), увеличению тыльного сгибания в голеностопных суставах (75%), снижению мышечного тонуса верхних конечностей (72%), улучшению сгибания/разгибания в коленных суставах (63%) и показателям мануальных функций по шкале MACS (56%).

ГЛАВА 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность проблемы и методологические основания обсуждения

Детский церебральный паралич остаётся одной из ведущих причин стойкого двигательного дефицита у детей и представляет собой сложное заболевание, обусловленное ранним повреждением развивающегося головного мозга, при котором клинические проявления определяются не только локальным структурным дефектом, но и нарушением системной организации нейронных сетей (Колесникова и соавт., 2024; Кольцов, Джомардлы, 2021; Hallman-Cooper, Rocha Cabrero, 2024). В последние годы всё чаще обсуждается концепция ДЦП как заболевания нарушенной коннективности, при котором страдают не только отдельные проводящие пути, но и межсетевые взаимодействия между моторными, сенсомоторными, когнитивными и регуляторными системами мозга (Jacobs et al., 2023; Абдулаев и соавт., 2024; Прошина и соавт., 2024; Biswal, Uddin, 2025).

Выраженность двигательных нарушений определяется не только объёмом первичного структурного повреждения, но и особенностями организации структурных и функциональных связей между различными отделами головного мозга (Damiano et al., 2022; Hong et al., 2023; Courtney, Hinault, 2024). В связи с этим изучение коннектома рассматривается как одно из перспективных направлений современной неврологии и лучевой диагностики, позволяющее оценить системные механизмы формирования двигательного дефицита и нейропластической перестройки головного мозга (Буккиева и соавт., 2022; Коптева и соавт., 2023; Atemiye et al., 2024).

В современной неврологии и лучевой диагностике всё большее значение приобретает мультимодальный подход, позволяющий оценивать не только морфологическое состояние головного мозга, но и микроструктурную организацию белого вещества, а также особенности функционального взаимодействия крупномасштабных нейронных сетей. Сочетанное применение структурной МРТ, диффузионной МРТ и функциональной МРТ покоя позволяет перейти от описания изолированных очагов поражения к оценке системной организации головного мозга

у детей с ДЦП.

Настоящее исследование выполнено в рамках проспективного продольного когортного дизайна и включало 178 детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии ДЦП. Основную группу составили 95 пациентов, группу сравнения — 83 пациента. Всем детям была выполнена мультимодальная МРТ головного мозга, включавшая структурную МРТ, диффузионную МРТ и функциональную МРТ покоя, а также стандартизированное клиничко-неврологическое обследование. Группы были сопоставимы по основным клиничко-демографическим, клиничко-функциональным и морфологическим характеристикам, что позволило интерпретировать выявленные различия с учётом исходной сопоставимости пациентов.

Дополнительным фактором, повышающим достоверность интерпретации результатов функциональной МРТ покоя, явились данные электроэнцефалографического исследования. У большинства обследованных пациентов регистрировались неспецифические диффузные изменения биоэлектрической активности головного мозга, соответствующие последствиям перинатального поражения центральной нервной системы, при отсутствии клинически значимой эпилептиформной активности. Это позволило минимизировать влияние сопутствующих пароксизмальных нарушений на показатели функциональной коннективности и повысить надёжность интерпретации выявленных изменений церебрального коннектома.

Логика обсуждения построена в соответствии с положениями, выносимыми на защиту. Такой подход позволяет рассматривать полученные данные не как последовательное описание отдельных методов исследования, а как доказательную базу для обоснования основных научных положений работы.

Обсуждение первого положения, выносимого на защиту

Проведённый анализ традиционной МРТ показал, что у всех обследованных пациентов выявлялись структурные изменения вещества головного мозга, преимущественно затрагивающие перивентрикулярное белое вещество. Доминирующим вариантом поражения являлась перивентрикулярная

лейкомаляция, определявшаяся у 84,9% пациентов основной группы и у 82,3% пациентов группы сравнения. Полученные результаты согласуются с современными представлениями о морфологическом субстрате спастической диплегии и соответствуют данным Kostović I. et al. (2021), согласно которым перивентрикулярное поражение белого вещества остаётся наиболее типичным вариантом повреждения мозга у детей с ДЦП, ассоциированным с нарушением созревания проводящих систем и процессов миелинизации.

Высокая уязвимость перивентрикулярных зон объясняется особенностями сосудистого обеспечения незрелого мозга и чувствительностью преолигодендроцитов к гипоксическому и воспалительному воздействию. Повреждение незрелого белого вещества сопровождается нарушением миелинизации, формированием глиоза и вторичным нарушением организации длинных проводящих путей (Kostović I. et al., 2021; Himmelmann K. et al., 2021). Принципиально важно, что зоны перивентрикулярного поражения анатомически соответствуют областям прохождения кортикоспинальных трактов, таламо-кортикальных проекций и ассоциативных проводящих путей, обеспечивающих моторный контроль, поддержание позы и сенсомоторную интеграцию.

Вместе с тем результаты настоящего исследования показывают, что структурная МРТ, несмотря на высокую диагностическую значимость, не исчерпывает всей патофизиологической картины спастической диплегии. Выраженность структурных изменений не всегда строго соответствовала тяжести двигательных нарушений. У части пациентов со схожей МР-картиной наблюдались различные уровни двигательных нарушений и функциональной мобильности. Аналогичные данные представлены в современных исследованиях структурной и функциональной организации коннектома, согласно которым клинический фенотип при ДЦП определяется не только объёмом морфологического повреждения, но и степенью сохранности нейронных сетей, особенностями межсетевого взаимодействия и возможностями нейропластической компенсации (Vallinoja J. et al., 2024).

Структурная МРТ, безусловно, остаётся необходимым звеном в

нейровизуализации детей со спастической диплегией, но опираться только на неё было бы неверно. Она хорошо показывает анатомический субстрат болезни, однако зачастую не даёт ответа на вопрос, почему функциональные нарушения выражены именно так, а не иначе. И тут на первый план выходит диффузионная МРТ она позволяет количественно оценить состояние микроструктуры проводящих путей.

В нашей работе мы применили этот метод и увидели у детей с диплегией системные изменения белого вещества: показатель фракционной анизотропии был снижен в комиссуральных, ассоциативных и проекционных трактах. Причём самые выраженные отклонения затронули структуры, которые непосредственно участвуют в сенсомоторной интеграции и управлении движениями, – кортикоспинальные пути, мозолистое тело и ассоциативные пучки. Эти находки хорошо согласуются с тем, что описывается в недавних публикациях (Ward, 2023; Vallinoja и соавт., 2024) – там тоже подчёркивается генерализованный характер поражения белого вещества при ДЦП

Снижение FA в кортикоспинальных трактах отражает нарушение организации основного нисходящего моторного пути, обеспечивающего выполнение произвольных движений. Современные исследования подтверждают, что повреждение кортикоспинального тракта является одним из ведущих нейровизуализационных маркеров двигательного дефицита при спастических формах ДЦП и связано с нарушением моторного контроля, координации движений и степенью функциональных ограничений (Vallinoja J. et al., 2024; Ward N.S., 2023). Однако полученные данные не позволяют ограничить патофизиологическую модель спастической диплегии только поражением кортикоспинального тракта, поскольку наряду с изменениями проекционных путей выявлялись нарушения комиссуральных и ассоциативных систем белого вещества.

Изменения в мозолистом теле свидетельствуют о нарушении межполушарной интеграции и двусторонней координации моторных функций. Мозолистое тело играет ключевую роль в обеспечении межполушарного взаимодействия, сенсомоторной интеграции и согласованности двигательных программ. Современные исследования с оценкой коннектома при ДЦП показывают, что

снижение структурной связанности мозолистого тела ассоциировано с нарушением бимануальной координации, постурального контроля и моторного обучения (Olusanya B.O. et al., 2023; Himmelmann K. et al., 2021). С позиции неврологии это особенно важно, поскольку клинический фенотип спастической диплегии включает не только нарушение ходьбы и повышенный мышечный тонус, но и расстройства постурального контроля, координации и моторного планирования.

Снижение показателей FA в ассоциативных путях, включая верхний продольный пучок и нижний лобно-затылочный пучок, вероятно, отражает нарушение взаимодействия между сенсорными, когнитивными и моторными системами. Современные представления о моторном контроле рассматривают движение не как изолированную функцию моторной коры, а как результат интеграции сенсорной информации, исполнительных функций, пространственной обработки и моторного планирования (Lotze M., 2021; Ward N.S., 2023). Верхний продольный пучок участвует во взаимодействии лобных и теменно-височных отделов мозга, а нижний лобно-затылочный пучок — в мультимодальной сенсорной интеграции и передаче зрительно-пространственной информации.

Дискуссионным остаётся вопрос о том, какие изменения при ДЦП являются первичными, а какие отражают вторичную перестройку мозга в условиях длительно существующего двигательного дефицита. Часть авторов рассматривает ведущим механизмом поражение проекционных моторных путей, прежде всего кортикоспинального тракта; другие подчёркивают, что клиническая картина ДЦП формируется вследствие нарушения распределённых сетей, включающих сенсомоторные, ассоциативные, подкорковые и мозжечковые структуры. Полученные нами данные поддерживают вторую точку зрения, поскольку изменения затрагивали не только нисходящие моторные пути, но и системы, обеспечивающие интеграцию сенсорной, когнитивной и двигательной информации.

Результаты функциональной MPT покоя также подтверждают системный характер нарушений организации головного мозга при спастической диплегии. Анализ функциональной коннективности выявил изменения взаимодействия между сенсомоторной, салиентной, фронтопариетальной сетями и сетью пассивного

режима работы мозга. Полученные результаты соответствуют современным представлениям о ДЦП как о заболевании нарушенной сетевой организации мозга, при котором страдают не только отдельные моторные структуры, но и взаимодействие между крупномасштабными функциональными системами (Olusanya B.O. et al., 2023; Vallinoja J. et al., 2024).

Отдельно хочется остановиться на салиентной сети. Её роль уникальна: она помогает вычленять наиболее значимые стимулы, отвечает за переключение между пассивным режимом мозга и центральной исполнительной системой, а также объединяет сенсорные, когнитивные и вегетативные сигналы. Если же её связи с моторными и исполнительными областями нарушены, то внимание хуже переключается на двигательные задачи, обработка проприоцепции искажается, а моторное поведение становится менее гибким и адаптивным (с этим согласуются и данные Schimmelpfennig с коллегами, 2023; Lee и соавт., 2024; Stein и др., 2025; Chun и др., 2025).

Если посмотреть на всю картину в целом – данные структурной МРТ, диффузионной и функциональной МРТ покоя – то спастическая диплегия предстаёт перед нами не просто как следствие перивентрикулярного поражения белого вещества. Да, это важный компонент, но далеко не единственный, определяющий клинический облик пациента. Анатомия задаёт базу для двигательных проблем, однако реальная тяжесть нарушений зависит ещё и от того, в каком состоянии находятся проводящие пути, насколько хорошо налажена межполушарная интеграция, сохранены ли ассоциативные системы и как именно взаимодействуют разные функциональные сети. Иными словами, полученные нами результаты прямо поддерживают первое положение, которое мы выносим на защиту.

Обсуждение второго положения, выносимого на защиту

Полученные результаты свидетельствуют о том, что лечение сопровождается изменениями как структурной, так и функциональной организации головного мозга. По данным диффузионной МРТ после курса лечения выявлено статистически значимое повышение показателей фракционной анизотропии в ряде проводящих

путей белого вещества, включая мозолистое тело и нижний продольный пучок ($p \leq 0,01$).

Полученные данные согласуются с результатами исследований Lotze M. (2021), Ward N.S. (2023), Damiano D.L. et al. (2022), в которых показано, что интенсивное сенсомоторное воздействие может сопровождаться изменением микроструктурной организации белого вещества и повышением показателей фракционной анизотропии. Вместе с тем интерпретация изменений FA после реабилитационных воздействий остаётся дискуссионной: данный показатель зависит не только от степени миелинизации, но и от плотности волокон, особенностей их пространственной ориентации и наличия перекрещивающихся трактов. Поэтому оценка структурной нейропластичности должна проводиться в комплексе с клиническими данными и результатами функциональной нейровизуализации.

В настоящем исследовании повышение FA сопровождалось положительной клинико-функциональной динамикой, что позволяет рассматривать выявленные изменения как проявление адаптивной перестройки белого вещества. Отдельного внимания заслуживает тот факт, что мы зафиксировали увеличение FA в мозолистом теле. Это структура, как известно, отвечает за межполушарный обмен сенсомоторной информацией, и сегодня уже накоплено достаточно данных, что состояние мозолистого тела напрямую влияет на то, насколько хорошо человек справляется с бимануальными задачами, удерживает равновесие и усваивает новые двигательные навыки (Olusanya и соавт., 2023; Vallinoja и др., 2024).

Но структурные сдвиги это лишь часть картины. Мы получили статистически значимые изменения и в функциональной организации мозга, причём самые яркие из них коснулись салиентной сети, сети пассивного режима, связей между подкоркой и мозжечком, а также орбитофронтально-сенсомоторных путей. И здесь в центр внимания выходит передняя островковая доля, ключевой узел салиентной сети.

В наших данных чётко прослеживается усиление функциональной коннективности правой передней островковой доли сразу с несколькими

областями: с правой лобной покрывкой ($T(56)=2,76$; $p=0,007853$), правой скорлупой ($T(56)=2,45$; $p=0,017587$), правой задней теменной корой ($T(56)=2,41$; $p=0,019027$) и левой передней верхней височной извилиной ($T(56)=2,36$; $p=0,021659$). Напомню, что передняя островковая доля считается центральным интегратором, она выделяет значимые сигналы и управляет переключением между пассивным режимом работы мозга и исполнительной сетью. То, что мы увидели, хорошо ложится в русло работ Schimmelpfennig (2023), Lee с коллегами (2024), Stein и др. (2025), Chun с соавторами (2025), а также исследования Sun (2024), где усиление связей островковой доли с подкорковыми и сенсомоторными зонами трактовалось как нейропластический процесс, улучшающий сенсомоторную интеграцию.

В литературе до сих пор нет единого мнения о том, что именно означает усиление функциональной связности. Иногда это компенсация, а не улучшение. Но в нашем случае эти изменения шли рука об руку с положительной клинической динамикой, и мы склонны интерпретировать их как адаптивную нейропластическую перестройку.

Из всех обнаруженных связей мне кажется особенно показательной та, что идёт между передней островковой долей и правой скорлупой. Скорлупа это один из главных узлов подкорковых моторных контуров. Она регулирует мышечный тонус, участвует в планировании движений и автоматизации навыков. Параллельно мы увидели усиление связи с задней теменной корой, а ведь она отвечает за пространственное восприятие и сенсорную интеграцию. Вместе это, скорее всего, отражает улучшенное взаимодействие между вниманием, сенсорикой и исполнительным контролем.

Интересно и обратное, связь между передней островковой долей и верхней латеральной затылочной корой, напротив, ослабла ($T(56)=-2,15$; $p=0,035914$). Аналогичный паттерн описывают Vallinoja и соавторы (2024), они заметили, что у детей с ДЦП после курса сенсомоторной терапии снижается опора на зрительный контроль движений, зато улучшается обработка проприоцептивных сигналов. С нашей точки зрения, это как раз про то же самое, организм перестаёт

компенсировать недостаток проприоцепции избыточным зрительным контролем и начинает активнее использовать внутренние сенсорные механизмы.

И наконец, ещё один важный блок, это изменения в подкорково-мозжечковых взаимодействиях, о которых стоит поговорить отдельно.

Установлено статистически значимое снижение функциональной связности между левым хвостатым ядром и правой VI долей мозжечка ($T(56)=-4,64$; $p=0,000021$), левой VI долей мозжечка ($T(56)=-3,59$; $p=0,000689$), а также правыми IV–V долями мозжечка ($T(56)=-3,49$; $p=0,000936$). Полученные данные согласуются с результатами Attanasio M. et al. (2025), показавшими, что перестройка подкорково-мозжечковых взаимодействий является одним из механизмов нейропластической адаптации после реабилитационных воздействий.

Снижение функциональной связности не следует автоматически трактовать как ухудшение взаимодействия между структурами. В литературе обсуждается концепция патологической гиперконнективности, согласно которой чрезмерная синхронизация отдельных компонентов моторной системы может отражать компенсаторную, но функционально неэффективную организацию двигательных контуров. С учётом положительной клинической динамики снижение функциональной связности между хвостатым ядром и мозжечком вероятнее отражает оптимизацию моторных контуров и уменьшение патологической гиперсинхронизации.

Важным результатом стало выявление перестройки взаимодействия между сетью пассивного режима работы мозга, салиентной сетью и центральной исполнительной сетью. После проведённого лечения мы зафиксировали ослабление функциональной связи сразу в двух парах областей: между правой латеральной теменной корой и передней поясной корой ($T(56)=-2,56$; $p=0,013340$), а также между левой верхней латеральной затылочной корой и дополнительной моторной областью ($T(56)=-2,36$; $p=0,021662$). На наш взгляд, это довольно показательный сдвиг. Он говорит о том, что межсетевое взаимодействие стало более эффективным, а функциональная организация мозга в целом приобрела более зрелый, скоординированный характер (аналогичные наблюдения есть у Lee и соавт., 2024;

Stein и др., 2025; Chun с коллегами, 2025).

Но не менее интересно и другое, мы увидели усиление коннективности между левой орбитофронтальной корой и целым рядом моторных зон в правом полушарии с латеральной сенсомоторной корой ($T(56)=3,39$; $p=0,001282$), постцентральной извилиной ($T(56)=3,10$; $p=0,003027$), центральной покрывной корой ($T(56)=3,02$; $p=0,003857$) и прецентральной извилиной ($T(56)=2,89$; $p=0,005430$). Орбитофронтальная кора, напомним, отвечает за оценку значимости сигналов, мотивационную составляющую, принятие решений и поведенческий контроль. То, что её связи с двигательными областями окрепли, может указывать на усиление влияния мотивационно-оценочных систем на планирование и реализацию движений и это, вероятно, тоже часть той адаптивной перестройки, которую мы наблюдаем.

Поскольку моторное обучение тесно связано с мотивационными системами мозга, усиление орбитофронтально-сенсомоторных взаимодействий может отражать повышение поведенческой значимости двигательной активности и более эффективное закрепление новых двигательных навыков (Lotze M., 2021; Ward N.S., 2023).

Таким образом, результаты структурной и функциональной нейровизуализации свидетельствуют, что лечение сопровождается многоуровневой перестройкой церебрального коннектома. Выявленные изменения затрагивают как микроструктурную организацию белого вещества, так и взаимодействие между крупномасштабными функциональными сетями мозга. Следовательно, полученные результаты подтверждают второе положение, выносимое на защиту.

Обсуждение третьего положения, выносимого на защиту

Третье положение диссертационной работы заключается в том, что изменения показателей мультимодальной МРТ достоверно связаны с положительной динамикой клинико-неврологических показателей, что позволяет рассматривать параметры коннектома как объективные маркеры эффективности реабилитации у детей со спастической диплегией.

Одной из основных задач настоящего исследования являлась оценка

взаимосвязи между нейровизуализационными изменениями и динамикой клинико-неврологических показателей. Принципиально важно понять, отражают ли зафиксированные сдвиги в структурной и функциональной архитектуре мозга действительные механизмы восстановления двигательной сферы, или же мы имеем дело с изолированными нейровизуализационными артефактами, не имеющими клинического эквивалента. Именно этот вопрос лежит в основе интерпретации наших данных.

Проведённый корреляционный анализ продемонстрировал устойчивые статистические связи между параметрами коннективности (как структурной, так и функциональной) и ключевыми показателями неврологического статуса пациентов. В первую очередь это касалось функциональных взаимодействий в системе мозжечок–кора головного мозга, а также активности сенсомоторных сетей: их изменения тесно коррелировали с результатами оценки постурального контроля, мышечного тонуса и общих функциональных возможностей.

Наиболее показательными оказались взаимосвязи с уровнем постуральной регуляции по шкале SATCo. Мы обнаружили, что улучшение баллов по этой шкале сопровождается перестройкой мозжечково-корковых связей, причём корреляции оказались достаточно сильными ($\rho = 0,58$; $p\text{-FDR} = 0,007$; $\rho = 0,60$; $p\text{-FDR} = 0,005$; $\rho = 0,56$; $p\text{-FDR} = 0,009$). Это не случайно: мозжечок традиционно рассматривается как центральный интегратор проприоцептивных сигналов, ответственный за поддержание позы, равновесие и моторное обучение. Современные работы, например Damiano D.L. с соавт. (2022) и Lee S. с коллегами (2024), также подтверждают, что мозжечково-корковые сети являются неотъемлемой частью системы постурального контроля.

В целом наши результаты хорошо вписываются в опубликованные данные, где прослеживается связь между церебральным коннектомом и двигательными исходами при детском церебральном параличе (Vallinoja J. et al., 2024; Jacobs N.P.T. et al., 2023). Однако работ, которые напрямую сопоставляли бы показатели SATCo и функциональной коннективности, до сих пор немного. Поэтому выявленные нами корреляции между прогрессом в постуральном контроле и реорганизацией

мозжечково-корковых взаимодействий приобретают самостоятельную ценность, они убедительно демонстрируют тесную сопряжённость этих двух процессов.

Не менее интересные результаты получены при анализе спастичности. Мы зафиксировали выраженные обратные корреляции между функциональной связностью и тонусом мышц по шкале Modified Ashworth Scale ($\rho = -0,66$; $p\text{-FDR} = 0,002$; $\rho = -0,55$; $p\text{-FDR} = 0,010$). Спастичность, как известно, возникает из-за нарушения нисходящей супраспинальной регуляции, что ведёт к дисбалансу в работе корковых, подкорковых и мозжечковых структур. Наши данные позволяют предположить, что снижение спастичности отражает не просто симптоматическое улучшение, а глубокую оптимизацию межструктурных взаимодействий внутри моторных сетей.

Что касается мануальной функции, то здесь тоже обнаружены значимые корреляции: изменения структурной и функциональной коннективности связаны с улучшением навыков рук по шкале MACS ($\rho = -0,52$; $p\text{-FDR} = 0,015$; $\rho = -0,50$; $p\text{-FDR} = 0,019$). Эти факты согласуются с исследованием Olusanya B.O. и др. (2023), в котором показана роль межполушарных связей и состояния мозолистого тела для бимануальной деятельности.

Тем не менее, остаётся дискуссионным, какие именно элементы коннектома вносят решающий вклад в восстановление ручной моторики. Одни авторы отдают приоритет кортикоспинальным трактам, другие комиссуральным и ассоциативным путям. Наш материал склоняет чашу весов в пользу системного взгляда, мы наблюдаем комплексные изменения, охватывающие разные отделы белого вещества, что подтверждает необходимость рассматривать коннектом как единую структурно-функциональную целостность.

Примечательно, что выявленные корреляции не ограничиваются только функциональными показателями, они затрагивают и микроструктуру белого вещества. Это говорит о согласованной, взаимообусловленной перестройке на обоих уровнях организации мозга в ходе реабилитационного процесса.

С практической точки зрения наши наблюдения крайне важны. Обычная структурная МРТ хорошо визуализирует последствия перинатального поражения

ЦНС, но малоинформативна для оценки динамики лечения. Диффузионная МРТ и МРТ покоя, напротив, способны улавливать тонкие сдвиги в организации мозга. Для лучевой диагностики это открывает перспективу использования коннектомных параметров в качестве объективных количественных биомаркеров эффективности реабилитации, а для неврологии подкрепляет представление о том, что нейропластическая реорганизация напрямую сопряжена с клиническим улучшением двигательных функций.

Таким образом, результаты настоящего исследования подтверждают наличие достоверной взаимосвязи между изменениями параметров мультимодальной МРТ и положительной динамикой клинико-неврологических показателей у детей со спастической диплегией. Выявленные корреляции свидетельствуют, что параметры структурной и функциональной коннективности отражают процессы нейропластической перестройки головного мозга и могут рассматриваться как объективные нейровизуализационные маркеры эффективности лечения. Следовательно, полученные результаты подтверждают третье положение, выносимое на защиту.

Итоговое обобщение результатов исследования

Проведённое исследование позволило комплексно оценить особенности структурной и функциональной организации головного мозга у детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии ДЦП и определить характер нейропластической перестройки на фоне лечения с использованием методов мультимодальной МРТ.

Полученные результаты показали, что спастическая диплегия характеризуется не только преимущественным поражением перивентрикулярного белого вещества, традиционно рассматриваемым в качестве основного морфологического субстрата заболевания, но и нарушением структурной и функциональной организации церебрального коннектома. Диффузионно-тензорная МРТ зафиксировала микроструктурную перестройку в проекционных, комиссуральных и ассоциативных проводящих путях. Параллельно с этим данные фМРТ в покое указывают на дезорганизацию взаимодействий между сенсомоторными, салиентными,

исполнительными и ассоциативными сетями мозга.

Кроме того, мы наблюдаем, что проведённое комплексное лечение сопровождается статистически значимой реорганизацией как структурного, так и функционального уровней церебральной архитектуры. Обнаруженные сдвиги затрагивают не только микроструктуру белого вещества, но и силу связей между ключевыми узлами крупномасштабных нейронных ансамблей. Особенно показательно усиление кооперации между салиентной сетью, базальными ганглиями, моторными и ассоциативными корковыми зонами, а также перестройка подкорково-мозжечковых взаимоотношений, всё это убедительно говорит о включении механизмов адаптивной нейропластичности.

И, пожалуй, самое значимое, мы установили прямую связь между этими нейровизуализационными феноменами и клиническим статусом пациентов. Корреляции параметров коннективности с динамикой постуральной регуляции, мышечного тонуса, мануальных навыков и общей моторики подтверждают, что изменения коннектома не ограничиваются «картинкой» – они имеют реальное функциональное значение и отражают клинически значимый ответ на терапию.

Таким образом, результаты настоящего исследования расширяют существующие представления о патофизиологии спастической диплегии и механизмах нейропластичности при ДЦП. В отличие от традиционного подхода, основанного преимущественно на оценке локальных структурных изменений, мультимодальная МРТ позволяет охарактеризовать системную организацию головного мозга, выявить особенности структурной и функциональной коннективности и проследить их динамику на фоне лечения.

С практической точки зрения полученные данные обосновывают целесообразность применения мультимодальной МРТ для комплексной оценки состояния головного мозга у детей со спастической диплегией. Сочетанное использование структурной МРТ, диффузионной МРТ и функциональной МРТ покоя позволяет не только уточнять характер церебральных нарушений, но и объективизировать процессы нейропластической перестройки, а также оценивать эффективность проводимых реабилитационных мероприятий.

Следовательно, результаты проведённого исследования подтверждают все положения, выносимые на защиту, и свидетельствуют о том, что параметры структурной и функциональной организации церебрального коннектома могут рассматриваться как объективные нейровизуализационные маркеры состояния и динамики двигательных функций у детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии ДЦП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Детский церебральный паралич по-прежнему входит в число главных причин, приводящих к стойкой инвалидизации детей. Это сложное, многогранное заболевание, и его клиническая картина определяется далеко не только локальным органическим дефектом мозга, не меньшее значение имеет нарушенное формирование и функционирование церебральных нейронных сетей в целом.

В последнее время в фокусе исследовательского интереса оказывается коннектом головного мозга как единая система структурно-функциональных связей, охватывающая разные отделы ЦНС. Такой ракурс позволяет взглянуть на спастическую диплегию иначе: не просто как на последствие перинатального повреждения белого вещества, а как на расстройство глобальной архитектуры мозга, при котором страдают сенсомоторная интеграция, моторный контроль, поддержание позы и даже когнитивные процессы.

При всём прогрессе современных нейровизуализационных методов традиционная МРТ зачастую не даёт ответа на вопрос, почему при сходных морфологических изменениях у разных пациентов тяжесть двигательных нарушений и особенности клиники могут существенно различаться. Это обуславливает необходимость использования методов, способных оценивать не только анатомический субстрат заболевания, но и особенности функционирования нейрональных сетей. В связи с этим применение мультимодальной магнитно-резонансной томографии, объединяющей структурную МРТ, диффузионную МРТ и функциональную МРТ покоя, представляется перспективным направлением для комплексного изучения механизмов формирования неврологического дефицита и процессов нейропластичности при детском церебральном параличе.

Настоящее исследование было выполнено на выборке из 178 детей со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии заболевания и позволило комплексно оценить структурные, микроструктурные и функциональные

характеристики головного мозга, а также их изменения в динамике лечения. Использование стандартизированного протокола мультимодальной МРТ в сочетании с клинико-неврологическим обследованием обеспечило возможность интегральной оценки взаимосвязи между особенностями церебрального коннектома и клиническими проявлениями заболевания.

Полученные результаты подтвердили, что морфологической основой спастической диплегии в большинстве случаев являются последствия перинатального поражения белого вещества головного мозга. У всех обследованных пациентов были выявлены структурные изменения различной степени выраженности, а доминирующим вариантом поражения являлась перивентрикулярная лейкомаляция. Локализация выявленных нами изменений приходится на зоны прохождения кортикоспинальных, таламокортикальных и ассоциативных трактов, тех самых структур, которые обеспечивают двигательную активность и сенсомоторную интеграцию. Это вполне согласуется с общепринятым взглядом на перивентрикулярное поражение белого вещества как на ключевое звено патогенеза спастической диплегии.

Однако структурные нарушения сами по себе не всегда объясняют клинические особенности пациентов. Мы видим, что при схожих морфологических находках степень двигательного дефицита может заметно различаться значит, существенную роль играют компенсаторные и адаптивные механизмы ЦНС. Это, в свою очередь, поддерживает взгляд на ДЦП как на патологию коннективности. Клиника определяется не столько объёмом изначального повреждения, сколько тем, как именно перестраиваются структурные и функциональные связи между разными мозговыми областями.

Особый интерес вызвали данные диффузионной МРТ, позволившие детально оценить состояние белого вещества. У обследованных детей мы обнаружили признаки генерализованных микроструктурных нарушений, они касались организации аксональных волокон и миелинизации. Причём наиболее выраженные сдвиги затрагивали именно те проводящие пути, которые соединяют моторные, сенсорные и ассоциативные корковые зоны. Из этого следует, что

поражение белого вещества при спастической диплегии имеет не локальный, а системный характер, распространяясь на разные уровни церебральной архитектуры.

После проведённого курса лечения мы зафиксировали статистически значимый рост фракционной анизотропии в ряде комиссуральных и ассоциативных трактов, включая структуры мозолистого тела и нижний продольный пучок. Учитывая короткий промежуток между двумя обследованиями, эти изменения вряд ли можно списать на естественное возрастное созревание мозга. Скорее, они отражают процессы структурной нейропластичности. Повышение ФА может указывать на улучшение упорядоченности аксонов, изменение степени миелинизации и более эффективное межрегиональное взаимодействие. Таким образом, диффузионная МРТ подтверждает, что мозг детей со спастической диплегией способен отвечать на реабилитационные воздействия структурной перестройкой.

Не менее содержательными оказались результаты фМРТ покоя. Оказалось, что у наших пациентов нарушения затрагивают не только моторные системы, но и крупномасштабные сети, участвующие в внимании, поведенческом контроле и сенсорной интеграции. Исходно мы видели снижение эффективности межсетевого взаимодействия и нарушение баланса между сетью пассивного режима, салиентной сетью, зрительными и сенсомоторными структурами.

Особенно примечательна перестройка салиентной сети. После лечения усилилась функциональная связь правой передней островковой доли с лобными, теменными и подкорковыми областями. Как известно, передняя островковая доля играет ключевую роль в переключении внимания между внутренними и внешними сигналами, а также в выборе наиболее релевантной информации для реализации двигательных программ. Усиление её взаимодействия с моторными и ассоциативными зонами, вероятно, говорит о повышении эффективности сенсомоторной интеграции и улучшении механизмов планирования движений.

Параллельно мы наблюдали ослабление связей между хвостатым ядром и структурами мозжечка. Можно предположить, что та гиперсвязанность

подкорково-мозжечковых контуров, которая отмечалась до лечения, носила компенсаторный характер организм был вынужден привлекать дополнительные ресурсы для поддержания двигательной активности. Её снижение после терапии, напротив, может свидетельствовать о переходе к более экономичному и физиологичному режиму контроля движений.

Значительный интерес вызывает и перестройка отношений между сетью пассивного режима, зрительными областями и сенсомоторными зонами. Уменьшение связности между некоторыми зрительными и моторными регионами позволяет думать, что двигательный контроль становится менее зависимым от зрительной обратной связи и всё больше опирается на автоматизированные механизмы. Такая реорганизация хорошо укладывается в представления о нейропластичности как об оптимизации работы церебральных сетей в ходе восстановления.

Отдельно стоит остановиться на усилении функциональных связей между орбитофронтальной корой и сенсомоторными отделами. Укрепление её связей с моторными зонами, по-видимому, отражает прогресс в двигательном обучении и повышение эффективности контроля движений на фоне лечения.

Клинико-неврологическое обследование подтвердило выраженную положительную динамику состояния пациентов после курса. Наиболее заметные сдвиги мы зарегистрировали по шкалам SATCo и Ashworth, а также по данным гониометрии – эти показатели изменились статистически значимо. Улучшение постурального контроля, уменьшение выраженности спастичности и увеличение объёма движений в суставах сопровождались положительными изменениями показателей мануальной функции и базовых учебных навыков. Полученные результаты свидетельствуют о том, что лечение оказывает комплексное влияние не только на двигательную сферу, но и на более широкий спектр функциональных возможностей ребёнка.

Принципиально важным результатом работы является выявление статистически значимых взаимосвязей между параметрами церебрального коннектома и клиническими показателями. Установлено, что улучшение

постурального контроля ассоциировано с усилением мозжечково-корковых взаимодействий и повышением интеграции сенсомоторной сети. Снижение спастичности сопровождалось ослаблением функциональной связности между хвостатым ядром и мозжечком, а также повышением фракционной анизотропии проводящих путей белого вещества. Улучшение мануальных функций коррелировало как с изменениями функциональной коннективности сенсомоторной сети, так и с повышением показателей фракционной анизотропии мозолистого тела.

Выявленные ассоциации подтверждают существование тесной взаимосвязи между структурной и функциональной организацией головного мозга и клиническими проявлениями заболевания. Полученные нами данные позволяют трактовать изменения, зафиксированные при мультимодальной МРТ, не как разрозненные нейровизуализационные артефакты, а как вполне конкретное подтверждение нейропластических процессов, обеспечивающих восстановление двигательной сферы.

В целом результаты нашей работы вносят существенные коррективы в современное понимание того, как формируется неврологический дефицит при спастической диплегии и как происходит его компенсация. Мы показали, что клиническая картина заболевания складывается не только из последствий перинатального повреждения мозга не меньшее значение имеет то, каким образом организован церебральный коннектом на структурном и функциональном уровнях. И здесь мультимодальный МРТ-подход оказывается незаменимым. Он даёт возможность не только объективно фиксировать нейропластические сдвиги, но и отслеживать их динамику, а также, что особенно ценно, намечать потенциальные маркеры, по которым можно судить об эффективности реабилитационных вмешательств.

Полученные результаты подтверждают высокую диагностическую и научную значимость комплексного анализа структурной МРТ, диффузионной МРТ и функциональной МРТ покоя у детей со спастической диплегией. Разработанный подход создаёт предпосылки для внедрения объективных нейровизуализационных

критериев оценки реабилитационного потенциала, мониторинга эффективности лечения и дальнейшего развития персонализированных технологий нейрореабилитации в неврологии и лучевой диагностике.

ВЫВОДЫ

1. По данным диффузионной МРТ у детей со спастической диплегией выявлены генерализованные микроструктурные изменения белого вещества в виде снижения фракционной анизотропии в кортикоспинальных трактах, мозолистом теле, таламокортикальных проекциях и ассоциативных пучках (верхний продольный пучок, нижний лобно-затылочный пучок), что отражает нарушение миелинизации и структурной организации проводящих путей ($p < 0,05$).

2. В основной группе после применения технологии проприоцептивной коррекции выявлена статистически значимая положительная динамика нейропластической реорганизации коннектома головного мозга: повышение фракционной анизотропии в комиссуральных (мозолистое тело) и ассоциативных (нижний продольный пучок) трактах ($p < 0,05$), а также улучшение показателей функциональной коннективности (усиление связей правой передней островковой доли, ослабление гиперсвязанности подкорково-мозжечковых контуров, оптимизация взаимодействия сеть пассивного режима работы мозга – салиентная сеть – зрительная кора). Достоверность выявленных различий мы проверяли с помощью как параметрических, так и непараметрических критериев, внося поправку на множественные сравнения (FDR).

3. Что касается связей между данными МРТ и клиническими улучшениями, они оказались весьма показательными. Например, рост функциональной связанности между первичной моторной корой и дополнительной моторной областью сопутствовал прогрессу в постуральном контроле по шкале SATCo ($r = 0,56$; $p = 0,009$). Параллельно повышение фракционной анизотропии в комиссуральных и кортикоспинальных путях шло в ногу со снижением спастичности по Ashworth ($r = -0,49$; $p = 0,021$). А усиление мозжечково-корковых взаимодействий, в свою очередь, сочеталось с улучшением как постуральной регуляции, так и устойчивости туловища ($r = 0,58-0,60$; $p = 0,005-0,007$).

4. В совокупности эти факты позволяют рассматривать показатели функциональной коннективности и фракционной анизотропии как

дополнительные объективные индикаторы структурно-функциональной реорганизации мозга и нейропластических процессов, запускаемых проприоцептивной коррекцией ($p < 0,05$).

5. Определена взаимосвязь между изменениями нейровизуализационных параметров и клинико-неврологических показателей на фоне применения технологий проприоцептивной стимуляции, сопровождавшаяся увеличением показателей фракционной анизотропии в ряде комиссуральных, ассоциативных и мозжечковых трактов, включая структуры мозолистого тела и нижний продольный пучок, что позволило выделить потенциальные нейровизуализационные маркеры процессов нейропластической перестройки и эффективности лечения.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Детям со спастической диплегией в поздней резидуальной стадии детского церебрального паралича рекомендуется выполнение мультимодальной магнитно-резонансной томографии, включающей структурную МРТ, диффузионно-тензорную МРТ и функциональную МРТ покоя, для комплексной оценки структурно-функциональной организации головного мозга и нейропластических изменений, ассоциированных с применением нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ», механизм действия которого связан с усилением проприоцептивной афферентации и модуляцией сенсомоторных церебральных сетей.

2. Для анализа данных мультимодальной МРТ целесообразно использование стандартизированных программных комплексов постобработки (SPM, CONN Toolbox, DSI Studio), обеспечивающих количественную оценку параметров структурной и функциональной коннективности головного мозга.

3. При проведении нейровизуализационных исследований у детей с детским церебральным параличом рекомендуется применение унифицированных протоколов диффузионной МРТ и функциональной МРТ покоя, соответствующих современным международным требованиям изучения церебрального коннектома.

4. Показатели функциональной коннективности и фракционной анизотропии могут рассматриваться в качестве дополнительных объективных нейровизуализационных маркеров нарушения структурно-функциональной организации головного мозга и процессов нейропластичности у детей со спастической диплегией.

5. Результаты мультимодальной магнитно-резонансной томографии рекомендуется учитывать при комплексной оценке неврологического статуса детей со спастической диплегией и интерпретации механизмов восстановления двигательных функций, связанных с нейропластической перестройкой церебральных сетей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшее развитие темы связано с углублённым изучением процессов структурной и функциональной реорганизации головного мозга у детей с различными формами ДЦП с использованием современных методов коннектомного анализа.

Перспективным направлением является применение технологий машинного обучения и анализа больших данных для прогнозирования эффективности реабилитации и формирования персонализированных подходов к лечению.

Целесообразно проведение пролонгированных исследований с несколькими временными точками наблюдения для оценки устойчивости нейропластических изменений и их связи с клиническим исходом.

Дополнительные возможности открывает применение ультравысокопольной МРТ, МР-морфометрии и МР-спектроскопии для изучения структурных, функциональных и метаболических изменений головного мозга у детей с ДЦП.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВЖК – внутрижелудочковое кровоизлияние

ВЖК — внутрижелудочковое кровоизлияние

ДВИ — диффузионно-взвешенная визуализация (Diffusion Weighted Imaging, DWI)

ДТИ — диффузионно-тензорная томография (Diffusion Tensor Imaging, DTI)

ДЦП — детский церебральный паралич

МРТ — магнитно-резонансная томография

ПВЛ — перивентрикулярная лейкомаляция

РАД — радиальная диффузивность (Radial Diffusivity, RD)

СД — средняя диффузивность (Mean Diffusivity, MD)

СПМ — сеть пассивного режима работы мозга (Default Mode Network, DMN)

СС — салиентная сеть (Salience Network, SN)

ФА — фракционная анизотропия (Fractional Anisotropy, FA)

фМРТ покоя — функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя (resting-state functional Magnetic Resonance Imaging, rs-fMRI)

ЦИС — центральная исполнительная сеть (Central Executive Network, CEN)

3D T1-MPRAGE — трёхмерная магнитно-резонансная последовательность с подготовкой намагниченности и быстрым градиентным эхо (Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo)

BOLD-сигнал – сигнал, зависимый от уровня оксигенации крови

BOLD-сигнал — сигнал, зависимый от уровня оксигенации крови (Blood Oxygen Level Dependent)

CFCS — система классификации коммуникативной функции (Communication Function Classification System)

CONN Toolbox — программный пакет для анализа функциональной коннективности головного мозга

DSI Studio — программное обеспечение для анализа диффузионной МРТ и трактографии

EDACS — система классификации способности к приёму пищи и глотанию (Eating

and Drinking Ability Classification System)

FDR — уровень ложноположительных результатов при множественных сравнениях (False Discovery Rate)

GLM — обобщённая линейная модель (General Linear Model)

GMFCS — система классификации крупных моторных функций (Gross Motor Function Classification System)

Hare/Hallet — шкала оценки способности удержания позы сидя

M1 — первичная моторная кора (Primary Motor Cortex)

MACS — система классификации мануальных способностей (Manual Ability Classification System)

MAS — модифицированная шкала Ашворта для оценки степени спастичности (Modified Ashworth Scale)

MATLAB — среда математического моделирования и анализа данных

MNI — стандартное пространство Монреальского неврологического института (Montreal Neurological Institute)

QoL — качество жизни (Quality of Life)

ROI — область интереса (Region of Interest)

SATCo — шкала сегментарной оценки контроля туловища (Segmental Assessment of Trunk Control)

SCPE — система наблюдения за детским церебральным параличом в Европе (Surveillance of Cerebral Palsy in Europe)

SMA — дополнительная моторная область (Supplementary Motor Area)

SPM12 — статистическое параметрическое картирование, версия 12 (Statistical Parametric Mapping)

T1-ВИ — T1-взвешенное изображение

T2-FLAIR — последовательность с подавлением сигнала свободной жидкости (Fluid Attenuated Inversion Recovery)

T2-ВИ — T2-взвешенное изображение

TR — время повторения (Repetition Time)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулаев, Ш. К. Функциональная магнитно-резонансная томография в состоянии покоя: анализ коннективности крупномасштабных сетей головного мозга / Ш. К. Абдулаев, Д. А. Тарумов, А. С. Богдановская // Медицинская визуализация. – 2024. – Т. 28, № 1. – С. 45-56.
2. Андрущенко, Н. В. Современные возможности оценки двигательного развития у детей младенческого и раннего возраста в клинической практике / Н. В. Андрущенко, А. Б. Пальчик, М. В. Осипова // Российский семейный врач. – 2024. – Т. 28, № 4. – С. 24-38.
3. Аникин, А. В. Визуализация поражений незрелого головного мозга: МР-паттерны отдалённых исходов. Клинические примеры/ А. В. Аникин, М. А. Басаргина, Е. В. Увакина // НЖБ. – 2021. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vizualizatsiya-porazheniy-nezrelogo-golovnogo-mozga-mr-patterny-otdalyonnyh-ishodov-klinicheskie-primery>
4. Артеменков, А. А. Сенсорная полимодальная интеграция когнитивных функций мозга человека / А. А. Артеменков // Ульяновский медико-биологический журнал. – 2025. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sensornaya-polimodalnaya-integratsiya-kognitivnyh-funktsiy-mozga-cheloveka>
5. Биомаркеры детского церебрального паралича / Т. А. Камилова, А. С. Голота, Д. А. Вологжанин [и др.] // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. – 2021. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/biomarkery-detskogo-tserebralnogo-paralicha>.
6. Бобылова, М. Ю. Применение зонисамида у детей с детским церебральным параличом и эпилепсией: обзор литературы и собственные данные / М. Ю. Бобылова, К. С. Боровиков // Русский журнал детской неврологии. – 2025. – № 2. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-zonisamida-u-detey-s-detskim-tserebralnym-paralichom-i-epilepsiey-obzor-literatury-i-sobstvennyye-dannye>
7. Ботулинотерапия спастических форм детского церебрального

паралича при различных локомоторных паттернах / Д. А. Красавина, А. В. Чемерис, О. Р. Орлова, Ю. И. Иванов // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2021. – Т. 121, № 6. – С. 119-123.

8. Вариант формирования постинсультной синергии руки. Клинический случай / А. С. Клочков, А. Е. Хижникова, И. С. Бакулин [и др.] // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 292-303.

9. Возможности МР-морфометрии головного мозга у детей с гипоксически-ишемической энцефалопатией / М. В. Ерохин, А. И. Тацилкин, А. В. Поздняков [и др.] // Визуализация в медицине. – 2020. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-mr-morfometrii-golovnogo-mozga-u-detey-s-gipoksicheski-ishemicheskoy-entsefalopatyei>

10. Вопросы оказания стоматологической помощи детям с церебральным параличом / З. Н. Елжанова, Д. М. Сулеменова, Н. Т. Байназарова [и др.] // Актуальные проблемы теоретической и клинической медицины. – 2024. – № 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-okazaniya-stomatologicheskoy-pomoschi-detyam-s-tserebralnym-paralichom>.

11. Головина, Ю. А. Система поддержки принятия экспертных решений у пациентов с детским церебральным параличом с применением методов искусственного интеллекта : дис. ... канд. мед. наук: 3.1.33. / Головина Ю. А. – Санкт-Петербург, 2024. – 119 с.

12. Детский церебральный паралич: современное состояние проблемы (обзор литературы) / Е. В. Колесникова, И. А. Вышлова, С. М. Карпов, О. А. Соболева // Русский журнал детской неврологии. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 20-28.

13. Диагностика и оптимальные методы коррекции сгибательной контрактуры коленного сустава у детей с церебральными параличами / Ф. Ш. Хамроев, М. М. Эшматов, Ш. О. Нурматова, Д. Г. Эшматова // EJMNS. – 2024. – № 10. – С. 33-37.

14. Динамика стабилметрических показателей у больных ДЦП, спастическая диплегия под влиянием занятий на стабилметрической платформе,

роботизированном комплексе «экзокисть-2» в сочетании с санаторно-курортным лечением / С. В. Власенко, В. Б. Павленко, Л. С. Орехова [и др.] // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. – 2023. – № 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamika-stabilometricheskih-pokazateley-u-bolnyh-dtsp-spasticheskaya-diplegiya-pod-vliyaniem-zanyatij-na-stabilometricheskoj>

15. Диффузионно-тензорная магнитно-резонансная томография у пациентов с последствиями односторонней родовой травмы плечевых сплетений / А. М. Ходоровская, А. Ю. Ефимцев, О. Е. Агранович [и др.] // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2024. – Т. 12, № 2. – С. 185-196.

16. Евреинов, В. В. Нутритивный статус детей с тяжелыми формами церебрального паралича, проходивших оперативное ортопедическое лечение по поводу спастических вывихов бедер / В. В. Евреинов, Т. А. Жирова // Педиатр. – 2023. – Т. 14, № 4. – С. 23-31.

17. Значимость кортикоспинальных, ассоциативных и межполушарных трактов в формировании посттравматического гемипареза / Э. Л. Погосбекян, Е. В. Шарова, Л. М. Фадеева [и др.] // Общая реаниматология. – 2023. – № 6. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/znachimost-kortikospinalnyh-assotsiativnyh-i-mezhpolusharnyh-traktov-v-formirovanii-posttravmaticheskogo-gemipareza>.

18. Игнатова, Т. С. Транслингвальная нейростимуляция головного мозга в комплексном лечении детей с церебральным параличом в поздней резидуальной стадии: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.11 / Игнатова Т. С. – Санкт-Петербург, 2021. – 160 с.

19. Катунина, Е. А. Патогенетические аспекты и подходы к терапии спастичности / Е. А. Катунина // Клиническая фармакология и терапия. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 18-24.

20. Кенис, В. М. Ультразвуковая эластография мышц у детей с детским церебральным параличом: систематический обзор литературы / В. М. Кенис, А. В. Сапоговский, Е. В. Мельченко [и др.] // Нервно-мышечные болезни. – 2022. – Т. 12,

№ 1. – С. 10-20.

21. Клиническое значение перивентрикулярной лейкомаляции в формировании детского церебрального паралича / О. К. Кирилочев, З. Г. Тарасова, А. С. Эйберман, Л. Г. Бочкова // ЛВ. – 2023. – № 11. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/klinicheskoe-znachenie-periventrikulyarnoy-leikomalyatsii-v-formirovanii-detskogo-tserebralnogo-paralicha>.

22. Когерентность ЭЭГ у детей с ДЦП на фоне реабилитации с применением нейроинтерфейса «мозг – компьютер – экзоскелет кисти» / В. Б. Павленко, С. В. Власенко, Е. Н. Чуян [и др.] // Вестник РГМУ. – 2024. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kogerentnost-eeg-u-detey-s-dtsp-na-fone-reabilitatsii-s-primeneniem-neyrointerfeysa-mozg-kompyuter-ekzoskelet-kisti>.

23. Кольцов, А. А. Общие вопросы детского церебрального паралича (научный обзор). Часть 1: этиология, патогенез и клинические особенности спастических форм / А. А. Кольцов, Э. И. Джомардлы // Физическая и реабилитационная медицина. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 36-47.

24. Коррекция нейроортопедических нарушений у детей с детским церебральным параличом / О. Б. Челпаченко, К. В. Жердев, А. П. Фисенко, Е. Ю. Дьяконова // НЖБ. – 2020. – № 2. – С. 92-98.

25. Коррекция сгибательной контрактуры коленного сустава у детей с церебральным параличом методом разгибательной остеотомии бедра: оценка сагиттального профиля / В. А. Новиков, В. В. Умнов, Д. С. Жарков [и др.] // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2025. – Т. 13, № 3. – С. 256-265.

26. Магнитно-резонансная томография коннектома в оценке результатов нейрореабилитации у пациентов с рассеянным склерозом (обзор литературы) / Ю. П. Коптева, А. С. Агафьина, Г. Е. Труфанов, С. Г. Щербак // Российский журнал персонализированной медицины. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 43-53.

27. Магнитно-резонансная томография при гипоксически-ишемических поражениях мозга у новорожденных: эволюция взглядов и перспективы развития / П. А. Романов, П. Л. Соколов, А. Г. Притыко, Н. В. Чебаненко // Доктор.Ру. – 2023.

– № 3. – С. 51-55.

28. Магнитно-резонансная трактография при ишемическом инсульте и болезни Альцгеймера / К. М. Шубина, С. В. Воробьев, С. Н. Янишевский [и др.] // Российский нейрохирургический журнал имени профессора А. Л. Поленова. – 2025. – Т. 17, № 2. – С. 127-138.

29. Магнитно-резонансная трактография: возможности и ограничения метода, современный подход к обработке данных / А. К. Никогосова, Т. М. Ростовцева, М. М. Берегов [и др.] // Медицинская визуализация. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 132-148.

30. Магнитно-резонансно-томографическая трактография при постинсультном двигательном дефиците: результаты исследования белого вещества головного мозга для индивидуального подбора методов помощи / Р. Р. Гизатуллин, Л. Р. Ахмадеева, Д. Э. Байков [и др.] // Эффективная фармакотерапия. – 2023. – Т. 19, № 54. – С. 26-30.

31. Маркин, К. В. Функциональная магнитно-резонансная томография покоя при биполярном аффективном расстройстве. Систематизированный обзор / К. В. Маркин // Обозрение психиатрии и медицинской психологии имени В.М. Бехтерева. – 2023. – Т. 57, № 3. – С. 15-29.

32. Медико-социальные проблемы распространенности детского церебрального паралича (обзор литературы) / К. Е. Моисеева, Г. А. Сулова, А. А. Заступова [и др.] // Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики. – 2024. – № 5. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/mediko-sotsialnye-problemy-rasprostranennosti-detskogo-tserebralnogo-paralicha-obzor-literatury>.

33. Миронова, А. К. Состояние здоровья детей, родившихся с очень низкой и экстремально низкой массой тела, и дифференцированная система оказания им медицинской помощи в раннем возрасте : дис. ... д-ра мед. наук: 3.1.21. / Миронова А. К. – Москва, 2022. – 399 с.

34. Молекулярно-генетические маркеры нейроглии при черепно-мозговых травмах и их использование для оценки функционального состояния спортсменов

(обзор) / А. В. Черепанова, Я. Р. Бравый, А. В. Карабельский [и др.] // Российский физиологический журнал им. И. М. Сеченова. – 2024. – Т. 110, № 7. – С. 1057-1074.

35. Нарушение микроструктурной целостности мозолистого тела по данным диффузионной МРТ как предиктор прогрессирования церебральной микроангиопатии / Л. А. Добрынина, Е. И. Кремнева, К. В. Шамтиева [и др.] // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2023. – Т. 123, № 11. – С. 95-104.

36. Нейровизуализационные особенности строения головного мозга у детей с детским церебральным параличом, полученные методом магнитно-резонансной трактографии / Е. А. Ключев, Г. Е. Шейко, М. Г. Дунаев [и др.] // Бюллетень сибирской медицины. – 2021. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrovizualizatsionnye-osobennosti-stroeniya-golovnogo-mozga-u-detey-s-detskim-tserebralnym-paralichom-poluchennye-metodom-magnitno>.

37. Нейросети головного мозга при сочетании хронической церебральной ишемии и сахарного диабета 2-го типа / В. Ф. Фокин, Н. В. Пономарева, Р. Н. Коновалов [и др.] // Вестник РГМУ. – 2023. – № 5. – С. 50-56.

38. Немкова, С. А. Ранняя дифференциальная диагностика и восстановительное лечение пациентов с детским церебральным параличом / С. А. Немкова, В. Г. Болдырев // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2024. – Т. 124, № 1. – С. 24-37.

39. Новейшие достижения в диагностике гипоксической ишемической энцефалопатии новорожденных / Н. Л. Стародубцева, Ч. М. Эльдаров, А. Р. Киртбая [и др.] // Вестник РГМУ. – 2022. – № 4. – С. 5-15.

40. Оценка микроструктуры белого вещества головного мозга по данным диффузионной магнитно-резонансной томографии при церебральной микроангиопатии / Е. И. Кремнева, И. И. Максимов, Л. А. Добрынина, М. В. Кротенкова // Анналы клинической и экспериментальной неврологии. – 2020. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-mikrostruktury-belogo-veschestva-golovnogo-mozga-po-dannym-diffuzionnoy-magnitno-rezonansnoy>

tomografii-pri-tserebralnoy.

41. Павлинова, Е. Б. Предикторы неблагоприятных неврологических исходов у недоношенных детей: современный взгляд на проблему / Е. Б. Павлинова, О. А. Савченко // Медицинский вестник Юга России. – 2024. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/prediktory-neblagopriyatnyh-nevrologicheskikh-ishodov-u-nedonoshennyh-detey-sovremennyy-vzglyad-na-problemu>.

42. Павлинова, Е. Б. Стратегия перинатальной нейропротекции у детей: современное состояние проблемы и перспективы / Е. Б. Павлинова, А. А. Губич, О. А. Савченко // Доктор.Ру. – 2024. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/strategiya-perinatalnoy-neyroproteksii-u-detey-sovremennoe-sostoyanie-problemy-i-perspektivy>.

43. Перинатальная заболеваемость и смертность детей, родившихся с экстремально низкой и очень низкой массой тела, в зависимости от соответствия массы гестационному возрасту / Т. К. Цечоева, А. Ю. Романов, Л. В. Ушакова, Д. Н. Дегтярев // Неонатология: Новости. Мнения. Обучение. – 2025. – Т. 4, № 50. – С. 9-19.

44. Перспективы применения нейроразвивающей терапии у детей с перинатальным поражением центральной нервной системы: обзор / М. А. Хан, Е. В. Костенко, Н. А. Микитченко [и др.] // Вестник восстановительной медицины. – 2025. – Т. 24, № 3. – С. 102-112.

45. Петров, К. Б. Постинсультные синкинезии: клинико-реабилитационные аспекты. Обзор / К. Б. Петров, Т. В. Митичкина // Вестник восстановительной медицины. – 2025. – Т. 24, № 1. – С. 75-83.

46. Повреждение головного мозга при нарушениях дыхания во сне: роль глии / И. А. Фильченко, Л. С. Коростовцева, М. В. Бочкарев, Ю. В. Свириев // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. – 2022. – Т. 122, № 1. – С. 15-22.

47. Порядок оформления медицинских документов о смерти в случае отсутствия патологоанатомического вскрытия: методические рекомендации. – М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации,. 2023. – 46 с.

48. Прошина, Е. А. Нейрогенетика функциональной коннективности мозга: современные подходы к изучению (обзор) / Е. А. Прошина, Т. С. Дейнекина, О. В. Мартынова // Современные технологии в медицине. – 2024. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/neyrogenetika-funktsionalnoy-konnektivnosti-mozga-sovremennye-podhody-k-izucheniyu-obzor>.

49. Реорганизация кортикоспинального тракта при postanoksических состояниях у детей: серия клинических наблюдений / Д. С. Каньшина, М. В. Ублинский, И. А. Мельников [и др.] // РМЖ. Мать и дитя. – 2024. – № 3. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/reorganizatsiya-kortikospinalnogo-trakta-pri-postanoksicheskikh-sostoyaniyah-u-detey-seriya-klinicheskikh-nablyudeniyy>.

50. Роль функциональной МРТ в картировании сенсорных обонятельных зон головного мозга у добровольцев при различной подаче одоранта / А. В. Поздняков, В. А. Новиков, М. М. Гребенюк [и др.] // Визуализация в медицине. – 2020. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-funktsionalnoy-mrt-v-kartirovanii-sensornyh-obonyatelnyh-zon-golovnogo-mozga-u-dobrovoltsev-pri-razlichnoy-podache-odoranta>.

51. Селивёрстов, Ю. А. Генетические фенокопии детского церебрального паралича / Ю. А. Селивёрстов, А. А. Шарков // НЖБ. – 2021. – № 1. – С. 51-58.

52. Современные возможности реабилитации при детском церебральном параличе (обзор) / И. Е. Повереннова, А. В. Захаров, Е. В. Хивинцева, А. С. Петрова // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2022. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-vozmozhnosti-reabilitatsii-pri-detskom-tserebralnom-paraliche-obzor>.

53. Современные методики нейровизуализации в оценке изменений коннектома головного мозга у пациенток с постмастэктомическим синдромом / Т. А. Буккиева, М. Л. Поспелова, А. Ю. Ефимцев [и др.] // Российский журнал персонализированной медицины. – 2022. – Т. 2, № 1. – С. 73-82.

54. Современные подходы к применению роботизированных устройств в комплексе реабилитации детей с церебральным параличом / Т. Ф. Голубова, С. В. Власенко, И. И. Марусич [и др.] // Вопросы курортологии, физиотерапии и

лечебной физической культуры. – 2023. – Т. 100, № 5. – С. 36-44.

55. Структурная реорганизация проводящих путей белого вещества головного мозга у пациентов со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции / К. С. Анпилогова, Д. С. Чегина, Т. С. Игнатова [и др.] // Трансляционная медицина. – 2021. – Т. 8, № 4. – С. 27-34.

56. Улучшение речи у детей с ДЦП на фоне реабилитации с применением нейроинтерфейса «мозг–компьютер–экзоскелет кисти» / В. Б. Павленко, С. В. Власенко, Л. С. Орехова, Е. А. Бирюкова // Вестник РГМУ. – 2023. – № 4. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-rechi-u-detey-s-dtsp-na-fone-reabilitatsii-s-primeneniem-neyrointerfeysa-mozg-kompyuter-ekzoskelet-kisti>.

57. Федорушкина, Н. А. Нутритивный статус детей со спастическими формами детского церебрального паралича : дис. ... канд. мед. наук: 3.1.21. / Федорушкина Н. А. – Москва, 2023. – 171 с.

58. Федотова, И. Р. Предпосылки и особенности использования воображения движения и интерфейса мозг-компьютер в реабилитации при детском церебральном параличе / И. Р. Федотова, П. Д. Бобров // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. – 2022. – Т. 72, № 1. – С. 87-99.

59. Функциональная и диффузионно-тензорная МРТ в оценке изменений коннектома головного мозга у детей со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции / Д. С. Чегина, К. С. Анпилогова, А. Ю. Ефимцев [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 6. – Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=31239>.

60. Функциональные и структурные характеристики головного мозга при левосторонней амблиопии у детей / А. В. Горбунов, В. В. Горев, Я. Р. Паникратова [и др.] // Неврологический журнал имени Л.О. Бадаляна. – 2025. – Т. 6, № 1. – С. 6-12.

61. Хирургическое лечение пациентов с детским церебральным параличом со сгибательной контрактурой коленного сустава. Обзор литературы / А. Р. Мустафаева, В. А. Новиков, В. В. Умнов, С. В. Виссарионов // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. – 2025. – Т. 13, №

2. – С. 202-214.

62. Эффект чрескожной электрической стимуляции спинного мозга на функциональную активность спинального торможения в системе мышц-синергистов голени у человека / А. А. Челноков, Л. В. Рощина, Д. А. Гладченко [и др.] // Физиология человека. – 2022. – Т. 48, № 2. – С. 14-27.

63. A Multisite Randomized Controlled Trial of Hand Arm Bimanual Intensive Training Including Lower Extremity for Children with Bilateral Cerebral Palsy / L. Sakzewski, Y. Bleyenheuft, I. Novak [et al.] // Journal of Pediatrics. – 2025. – Vol. 284. – Art. 114666.

64. A new methodological approach to characterize selective motor control in children with cerebral palsy / V. Graci, M. O'Neill, M. Bloss [et al.] // Frontiers in Human Neuroscience. – 2024. – Vol. 18. – Art. 1330315.

65. A systematic review of alterations in sensorimotor networks following stroke: implications for integration and functional outcomes across recovery stages / N. S. A. Sahrizan, N. Yahya, Z. K. Law [et al.] // Frontiers in Neurology. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1456146.

66. Age of Diagnosis, Fidelity and Acceptability of an Early Diagnosis Clinic / A. Te Velde, E. Tantsis, I. Novak [et al.] // Brain Sciences. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Art. 1074.

67. Altered corpus callosum structure in adolescents with cerebral palsy: connection to gait and balance / J. Jaatela, T. Nurmi, J. Vallinoja [et al.] // Brain Structure and Function. – 2023. – Vol. 228, No. 8. – P. 1901-1915.

68. Amemiya, S. Resting-State fMRI: Emerging Concepts for Future Clinical Application / S. Amemiya, H. Takao, O. Abe // Journal of Magnetic Resonance Imaging. – 2024. – Vol. 59, No. 4. – P. 1135-1148.

69. Ankle proprioception in children with cerebral palsy / E. Boyer, Q. Huang, S. Ngwesse [et al.] // Journal of Pediatric Rehabilitation Medicine. – 2024. – Vol. 17, No. 1. – P. 75-83.

70. Assessment of cortical activity, functional connectivity, and neuroplasticity in cerebral palsy using functional near-infrared spectroscopy: A scoping review / O. A.

Khan, S. Rahman, K. Baduni, C. M. Modlesky // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025. – Vol. 67, No. 7. – P. 875-891.

71. Associations between maternal gestational diabetes mellitus and offspring cerebral palsy / H. Peng, Y. Shu, S. Lu [et al.] // *Translational Pediatrics*. – 2024. – Vol. 13, No. 11. – P. 1923-1932.

72. Aswendt, M. Functional hyperconnectivity related to brain disease: maladaptive process or element of resilience? / M. Aswendt, M. Hoehn // *Neural Regeneration Research*. – 2023. – Vol. 18, No. 7. – P. 1489-1490.

73. Ayoub, N. Botulinum Toxin Therapy: A Comprehensive Review on Clinical and Pharmacological Insights / N. Ayoub // *Journal of Clinical Medicine*. – 2025. – Vol. 14, No. 6. – Art. 2021.

74. Badawi, N. Perinatal care with a view to preventing cerebral palsy / N. Badawi, S. McIntyre, R. W. Hunt // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2021. – Vol. 63, No. 2. – P. 156-161.

75. Biswal, B. B. The history and future of resting-state functional magnetic resonance imaging / B. B. Biswal, L. Q. Uddin // *Nature*. – 2025. – Vol. 641, No. 8065. – P. 1121-1131.

76. Brain functional connectivity and activity during motor control in children with cerebral palsy: a pilot cross-sectional fNIRS study / X. Huang, H. Zhou, J. Zhang [et al.] // *Translational Pediatrics*. – 2025. – Vol. 14, No. 5. – P. 812-823.

77. Brain network properties in chronic pain-a systematic review and meta-analysis of graph-based connectivity metrics / L. Butry, J. Thomä, S. Elsenbruch [et al.] // *Frontiers in Neuroscience*. – 2025. – Vol. 19. – Art. 1672542.

78. Brain structural and functional connectivity and network organization in cerebral palsy: A scoping review / N. P. T. Jacobs, P. J. W. Pouwels, M. M. van der Krogt [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2023. – Vol. 65, No. 9. – P. 1157-1173.

79. Bykova, K. M. Eating and Drinking Ability Classification System to detect aspiration risk in children with cerebral palsy: a validation study / K. M. Bykova, U. Frank, L. L. Girolami // *European Journal of Pediatrics*. – 2023. – Vol. 182, No. 7. – P.

3365-3373.

80. Causal modelling demonstrates metabolic power is largely affected by gait kinematics and motor control in children with cerebral palsy / P. K. Gill, K. M. Steele, J. M. Donelan, M. H. Schwartz // PLoS ONE. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – Art. e0285667.

81. Cerebral Palsy - Early Diagnosis and Intervention Trial: protocol for the prospective multicentre CP-EDIT study / C. E. Hoei-Hansen, L. Weber, M. Johansen [et al.] // BMC Pediatrics. – 2023. – Vol. 23, No. 1. – Art. 544.

82. Cerebral palsy / I. Novak, M. Jackman, M. Finch-Edmondson, M. Fahey // The Lancet. – 2025. – Vol. 406, No. 10499. – P. 174-188.

83. Cerebral palsy as a childhood-onset neurological disorder / N. G. Sandran, N. Badawi, J. Gecz, C. L. van Eyk // Seminars in Fetal and Neonatal Medicine. – 2024. – Vol. 29, No. 2-3. – Art. 101551.

84. Cerebral palsy in children: a clinical overview / D. R. Patel, M. Neelakantan, K. Pandher, J. Merrick // Translational Pediatrics. – 2020. – Vol. 9, No. Suppl. 1. – P. 125-135.

85. Cerebral palsy in children: A clinical practice review / D. R. Patel, K. M. Bovid, R. Rausch [et al.] // Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care. – 2024. – Vol. 54, No. 11. – Art. 101673.

86. Cerebral palsy registers around the world: A survey / S. Goldsmith, H. Smithers-Sheedy, N. Almasri [et al.] // Developmental Medicine and Child Neurology. – 2024. – Vol. 66, No. 6. – P. 765-777.

87. Cerebral palsy: potential risk factors and functional status among children under three years, a case-control study in northwest Iran / M. Haramshahi, V. Toopchizadeh, S. Pourzeinali [et al.] // BMC Pediatrics. – 2024. – Vol. 24, No. 1. – Art. 695.

88. Changes Induced by Early Hand-Arm Bimanual Intensive Therapy Including Lower Extremities in Young Children With Unilateral Cerebral Palsy: A Randomized Clinical Trial / R. Araneda, D. Ebner-Karestinos, J. Paradis [et al.] // JAMA Pediatrics. – 2024. – Vol. 178, No. 1. – P. 19-28.

89. Characteristics of children with ataxic cerebral palsy / K. Pettersson, M.

Johansen, R. Jahnsen, E. Rodby-Bousquet // BMC Pediatrics. – 2025. – Vol. 25, No. 1. – Art. 335.

90. Classification of events contributing to postneonatal cerebral palsy / L. Pudig, M. Delobel-Ayoub, K. Horridge [et al.] // Developmental Medicine and Child Neurology. – 2024. – Vol. 66, No. 2. – P. 250-257.

91. Clinical and instrument-based assessment of balance, gait, and motor functions in pediatric cerebral palsy: A systematic review / D. Karibzhanova, P. K. Jamwal, A. R. Khawaja [et al.] // Wearable Technologies. – 2025. – Vol. 6. – Art. e29.

92. Clinical Characteristics Suggestive of a Genetic Cause in Cerebral Palsy: A Systematic Review / A. M. Janzing, E. Eklund, T. J. De Koning, H. Eggink // Pediatric Neurology. – 2024. – Vol. 153. – P. 144-151.

93. Clinical Phenotype of Cerebral Palsy Depends on the Cause: Is It Really Cerebral Palsy? / C. Metz, M. Jaster, E. Walch [et al.] // Journal of Child Neurology. – 2022. – Vol. 37, No. 2. – P. 112-118.

94. Clinical spectrum and associated comorbidities of cerebral palsy among children in Eastern India / R. Kumar, B. Biswas, M. Kumar [et al.] // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – Art. 44678.

95. Cohort profile: the Swiss Cerebral Palsy Registry (Swiss-CP-Reg) cohort study / F. N. Belle, S. Hunziker, J. Fluss [et al.] // Swiss Medical Weekly. – 2022. – Vol. 152. – Art. w30139.

96. Collagenase treatment does not impair fiber contractile function in muscle biopsies from children with cerebral palsy / F. Syed, L. Omerkhil, V. Joumaa [et al.] // Physiological Reports. – 2025. – Vol. 13, No. 21. – Art. e70645.

97. Communication disorders in young children with cerebral palsy / L. Pennington, M. Dave, J. Rudd [et al.] // Developmental Medicine and Child Neurology. – 2020. – Vol. 62, No. 10. – P. 1161-1169.

98. Comorbidities in cerebral palsy: a patient registry study / S. J. Hollung, I. J. Bakken, T. Vik [et al.] // Developmental Medicine and Child Neurology. – 2020. – Vol. 62, No. 1. – P. 97-103.

99. Congenital anomalies in children with postneonatally acquired cerebral

palsy: an international data linkage study / S. Goldsmith, S. McIntyre, H. Scott [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2021. – Vol. 63, No. 4. – P. 421-428.

100. Courtney, S. M. Anatomical Connectivity Constrains Dynamic Functional Connectivity among Neural Systems: Implications for Cognition and Behavior / S. M. Courtney, T. Hinault // *Journal of Cognitive Neuroscience*. – 2024. – Vol. 36, No. 12. – P. 2712-2724.

101. Cross-Cultural Adaptation and Validation of the Mini-Eating and Drinking Ability Classification System for Korean Children with Cerebral Palsy Aged 18-36 Months / Y. G. Yi, S. Yang, J. Y. Kwon [et al.] // *Children*. – 2025. – Vol. 12, No. 10. – Art. 1348.

102. Current approach to cerebral palsy / A. Saranti, P. Dragoumi, A. Papavasiliou, D. Zafeiriou // *European Journal of Paediatric Neurology*. – 2024. – Vol. 51. – P. 49-57.

103. Current Therapies for Neonatal Hypoxic-Ischaemic / K. Totorou, C. Sisa, A. Iqbal [et al.] // *Frontiers in Synaptic Neuroscience*. – 2021. – Vol. 13. – Art. 709301.

104. Cystic Periventricular Leukomalacia Worsens Developmental Outcomes of Very-Low-Birth Weight Infants with Intraventricular Hemorrhage—A Nationwide Cohort Study / J. H. Cha, N. Choi, J. Kim [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2022. – Vol. 11, No. 19. – Art. 5886.

105. Declining trends in birth prevalence and severity in Australia / H. Smithers-Sheedy, E. Waight, S. Goldsmith [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2022. – Vol. 64, No. 9. – P. 1114-1122.

106. Defining Goal-Directed Training for Children with Cerebral Palsy: A Scoping Review and Framework for Implementation / A. Shierk, B. Barry Thias, H. Becker [et al.] // *Children*. – 2025. – Vol. 12, No. 8. – Art. 1039.

107. Definition and diagnosis of cerebral palsy in genetic studies: a systematic review / R. Pham, B. W. Mol, J. Gecz [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2020. – Vol. 62, No. 9. – P. 1024-1030.

108. Definitions and classification of malformations of cortical development / M. Severino, A. F. Geraldo, N. Utz [et al.] // *Brain*. – 2020. – Vol. 143, No. 10. – P. 2874-

2894.

109. Denoising strategies of functional connectivity MRI data in lesional and non-lesional brain diseases / S. Wunderlich, C. Alici, S. Motevalli [et al.] // *Imaging Neuroscience*. – 2025. – Vol. 3. – Art. IMAG.a.968.

110. Development of children, adolescents, and young adults with cerebral palsy according to the ICF: A scoping review / P. S. C. Chagas, E. D. D. Magalhães, R. R. Sousa Junior [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2023. – Vol. 65, No. 6. – P. 745-753.

111. Developmental coupling of cerebral blood flow and fMRI fluctuations in youth / E. B. Baller, A. M. Valcarcel, A. Adebimpe [et al.] // *Cell Reports*. – 2022. – Vol. 38, No. 13. – Art. 110576.

112. Disruptions of morphological brain networks and their associations with multi-symptoms in children with spastic cerebral palsy / C. Zhao, X. Qiu, X. Luo [et al.] // *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. – 2025. – Vol. 15, No. 9. – Art. 7749-7760.

113. Dual-Task Training Interventions for Cerebral Palsy: A Systematic Review and Meta-Analysis of Effects on Postural Balance and Walking Speed / I. Cortés-Pérez, M. L. Á. Castillo-Pintor, R. Barrionuevo-Berzosa [et al.] // *Medicina*. – 2025. – Vol. 61, No. 8. – Art. 1415.

114. Dynamic Task-Related Changes in Electroencephalography Brain Connectivity During a Button-Press Task in Children with and Without Bilateral Cerebral Palsy / S. W. Lee, T. C. Bulea, J. E. Kline, D. L. Damiano // *Brain Connectivity*. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – P. 162-174.

115. EEG coherence in children with cerebral palsy against the background of rehabilitation employing a brain-computer-hand exoskeleton neurointerface / V. B. Pavlenko, S. V. Vlasenko, E. N. Chuyan [et al.] // *Bulletin of RSMU*. – 2024. – No. 3. – P. 36-41.

116. Effect of the Dynamic Orthotic Garment on Postural Control, and Endurance in Children with Spastic Diplegic Cerebral Palsy: A Randomized Controlled Trial / H. A. Emara, A. H. Al-Johany, O. A. Khaled [et al.] // *Journal of Multidisciplinary Healthcare*.

– 2024. – Vol. 17. – P. 419-428.

117. Effectiveness of Intensive and Distributed Bilateral Intensive Training for Children With Unilateral Cerebral Palsy / K. J. Liang, Z. C. Weng, H. L. Chen, T. N. Wang // *American Journal of Occupational Therapy*. – 2025. – Vol. 79, No. 4. – Art. 7904205150.

118. Effectiveness of therapeutic interventions on participation in children with cerebral palsy: A systematic review and meta-analysis / R. Dimakopoulos, T. Vakalaki, A. Spinou [et al.] // *Child: Care, Health and Development*. – 2024. – Vol. 50, No. 4. – Art. e13301.

119. Effectiveness of treadmill-based virtual-reality biofeedback training to improve gait function in children and adolescents with congenital and acquired brain injury / S. H. Schless, G. Sorek, I. Schurr [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 16, No. 1. – Art. 2133.

120. Effectiveness of virtual reality for functional disorders in cerebral palsy: an overview of systematic reviews and meta-analyses / E. Fang, H. Guan, B. Du [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1582110.

121. Effects of virtual reality motor games on motor skills in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis / Z. Xue, W. Zhang, N. Zhou [et al.] // *Frontiers in Psychology*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 1483370. –

122. Emrick, L. T. The Expanding Role of Genetics in Cerebral Palsy / L. T. Emrick, S. M. DiCarlo // *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*. – 2020. – Vol. 31, No. 1. – P. 15-24.

123. Epidemiology of cerebral palsy in low- and middle-income countries: preliminary findings from an international multi-centre cerebral palsy register / I. Jahan, M. Muhit, D. Hardianto [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2021. – Vol. 63, No. 11. – P. 1327-1336.

124. Evaluating topological and graph-theoretical approaches to extract complex multimodal brain connectivity patterns in multiple sclerosis / T. Lozano-Bagén, E. Martinez-Heras, G. Pontillo [et al.] // *Health Information Science and Systems*. – 2025. – Vol. 13, No. 1. – Art. 68.

125. Evaluation of spasticity: IFCN Handbook Chapter / E. R. Therkildsen, J. Lorentzen, M. A. Perez, J. B. Nielsen // *Clinical Neurophysiology*. – 2025. – Vol. 173. – P. 1-23.
126. Exploring communication impairments in children with spastic cerebral palsy through neurovascular coupling: a cross-sectional study / H. Yu, Y. Luo, C. Zhao [et al.] // *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. – 2025. – Vol. 15, No. 11. – P. 11279-11291.
127. Exploring cortical excitability in children with cerebral palsy through lower limb robot training based on MI-BCI / W. Qi, Y. Zhang, Y. Su [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – Art. 12285.
128. Exploring integrated care for children with cerebral palsy: a stakeholder analysis / S. Askeland, V. Guise, K. Aase, M. K. R. Sogstad // *BMC Health Services Research*. – 2025. – Vol. 25, No. 1. – Art. 936.
129. Exploring structural connectomes in children with unilateral cerebral palsy using graph theory / A. Radwan, L. Decraene, P. Dupont [et al.] // *Human Brain Mapping*. – 2023. – Vol. 44, No. 7. – P. 2741-2753.
130. Feedforward control in children with cerebral palsy and association with white matter integrity / O. Martinie, P. Karan, M. Simoneau [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1515432.
131. Frontoparietal Structural Network Disconnections Correlate With Outcome After a Severe Stroke / L. Frontzkowski, F. Fehring, B. M. Frey [et al.] // *Human Brain Mapping*. – 2024. – Vol. 45, No. 16. – Art. e70060.
132. 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 / D. L. Damiano, J. J. Pekar, S. Mori [et al.] // *Frontiers in Rehabilitation Sciences*. – 2022. – Vol. 3. – Art. 811509.
133. Functional classification systems in Brazilian children with cerebral palsy: Reliability and associations between functional levels / K. M. A. Ayupe, A. L. O. Lima, G. C. de Alcântara Gomes [et al.] // *Developmental Neurorehabilitation*. – 2024. – Vol. 27, No. 7. – P. 243-250.

134. Functional Communication Abilities in Youth With Cerebral Palsy / C. Koopmans, A. Sakash, J. Soriano [et al.] // *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*. – 2022. – Vol. 53, No. 1. – P. 88-103.
135. Functional connectivity changes are associated with disability progression in multiple sclerosis: a longitudinal fMRI study / C. Piervincenzi, A. Ojha, S. Tommasin [et al.] // *Journal of Neurology*. – 2025. – Vol. 272, No. 12. – Art. 787.
136. Functional connectivity of sensorimotor network is enhanced in spastic diplegic cerebral palsy: A multimodal study using fMRI and MEG / J. Vallinoja, T. Nurmi, J. Jaatela [et al.] // *Clinical Neurophysiology*. – 2024. – Vol. 157. – P. 4-14.
137. Functional outcomes of children with dyskinetic cerebral palsy depend on etiology and gestational age / Y. Kitai, S. Hirai, N. Okuyama [et al.] // *European Journal of Paediatric Neurology*. – 2021. – Vol. 30. – P. 108-112.
138. Gelkop, N. Participation, environment, and quality of life in children with cerebral palsy and physical disabilities / N. Gelkop, B. Engel-Yeger // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025.
139. Genetic diagnostic yield by MRI pattern in children with cerebral palsy: a population-based study / J. G. Berry, A. Taranath, R. Goetti [et al.] // *EBioMedicine*. – 2025. – Vol. 122. – Art. 106013.
140. Genetic pathways in cerebral palsy: implications for precision diagnosis / Y. Xu, Y. Li, S. A. Richard [et al.] // *Neural Regeneration Research*. – 2024. – Vol. 19, No. 7. – P. 1499-1508.
141. Global prevalence of cerebral palsy: A systematic analysis / S. McIntyre, S. Goldsmith, A. Webb [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2022. – Vol. 64, No. 12. – P. 1494-1506.
142. Global prevalence of developmental disabilities in children and adolescents: A systematic umbrella review / B. O. Olusanya, T. Smythe, F. A. Ogbo [et al.] // *Frontiers in Public Health*. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1122009.
143. Golestani, A. M. Comparing data-driven physiological denoising approaches for resting-state fMRI: implications for the study of aging / A. M. Golestani, J. J. Chen // *Frontiers in Neuroscience*. – 2024. – Vol. 18. – Art. 1223230.

144. Gross Motor Function Measure-66 Item Sets for use with infants and toddlers at high risk for cerebral palsy: Construct validity and responsiveness / N. A. Koziol, C. D. Butera, L. Y. Hsu [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025. – Vol. 67, No. 8. – P. 1063-1074.
145. Growth and Neurodevelopmental Outcomes of Preterm Infants Born < 26 Weeks / G. Res, R. F. Bishara, P. T. Church [et al.] // *Children*. – 2024. – Vol. 11, No. 4. – Art. 475.
146. Hallman-Cooper, J. L. Cerebral Pals/ J. L. Hallman-Cooper, F. Rocha Cabrero // *StatPearls* [Internet]. – Treasure Island (FL) : StatPearls Publishing, 2025.
147. Hong, J. The Long-Term Outcome and Rehabilitative Approach of Intraventricular Hemorrhage at Preterm Birth / J. Hong, D. W. Rha // *Journal of Korean Neurosurgical Society*. – 2023. – Vol. 66, No. 3. – P. 289-297.
148. Hunt, R. W. Cerebral palsy in Australia: optimism and challenges / R. W. Hunt // *Medical Journal of Australia*. – 2024. – Vol. 221, No. 10. – P. 529-530.
149. Hwang, Y. Developing a Bimanual Task-Oriented Training Program for Young Children With Unilateral Cerebral Palsy: A Delphi Consensus Study / Y. Hwang, J. Tak, J. Y. Kwon // *American Journal of Occupational Therapy*. – 2025. – Vol. 79, No. 4. – Art. 7904205100.
150. Improved Myelination following Camp Leg Power, a Selective Motor Control Intervention for Children with Spastic Bilateral Cerebral Palsy: A Diffusion Tensor MRI Study / A. Vuong, S. H. Joshi, L. A. Staudt [et al.] // *American Journal of Neuroradiology*. – 2023. – Vol. 44, No. 6. – P. 700-706.
151. Improving neuroplasticity and Quality of Life in children with Cerebral Palsy: a customized intensive motor training protocol integrating the HABIT-ILE approach / V. Vacchini, B. Brafa, R. Nicotra [et al.] // *Frontiers in Rehabilitation Sciences*. – 2025. – Vol. 6. – Art. 1613103.
152. Increased functional connectivity patterns in mild Alzheimer's disease: A rsfMRI study / L. Penalba-Sánchez, P. Oliveira-Silva, A. L. Sumich, I. Cifre // *Frontiers in Aging Neuroscience*. – 2023. – Vol. 14. – Art. 1037347.
153. Increasing Prevalence of Cerebral Palsy Among Two-Year-Old Children

Born at <27 Weeks of Gestation: A Cohort Study / S. B. DeMauro, S. A. McDonald, R. J. Heyne [et al.] // *Journal of Pediatrics*. – 2024. – Vol. 268. – Art. 113944.

154. Instruments for assisted vaginal birth / G. L. Verma, J. J. Spalding, M. D. Wilkinson [et al.] // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – 2021. – Vol. 9, No. 9. – Art. CD005455.

155. Kinney, H. C. The encephalopathy of prematurity: one pediatric neuropathologist's perspective / H. C. Kinney // *Seminars in Pediatric Neurology*. – 2009. – Vol. 16, No. 4. – P. 179-190.

156. Lesion distribution and network mapping in dyskinetic cerebral palsy / A. L. de Almeida Marcelino, B. Al-Fatly, M. S. Tuncer [et al.] // *Brain Communications*. – 2025. – Vol. 7, No. 3. – Art. fcaf228.

157. Lights and Shadows of TORCH Infection Proteomics / J. Macedo-da-Silva, C. R. F. Marinho, G. Palmisano, L. Rosa-Fernandes // *Genes*. – 2020. – Vol. 11, No. 8. – Art. 894.

158. Limited Evidence of Functional Benefit After Upper Limb Botulinum Toxin Treatment in Children With Cerebral Palsy: Systematic Review and Meta-analysis / O. Z. Gresits, M. Vezér, M. A. Engh [et al.] // *American Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*. – 2025. – Vol. 104, No. 2. – P. 108-116.

159. Motor development trajectories of children with cerebral palsy in a community-based early intervention program in rural South India / M. Brien, D. Krishna, R. Ponnusamy [et al.] // *Research in Developmental Disabilities*. – 2024. – Vol. 154. – Art. 104829.

160. Motor practice related changes in the sensorimotor cortices of youth with cerebral palsy / M. J. Kurz, B. K. Taylor, E. Heinrichs-Graham [et al.] // *Brain Communications*. – 2024. – Vol. 6, No. 5. – Art. fcae332.

161. Movement-Based Priming: A Clinical Trial on the Effect of Cross-Training on Locomotor Abilities of Children with Unilateral Cerebral Palsy / T. M. Elsaheed, R. K. Elnaggar, M. F. Elbanna [et al.] // *Children*. – 2025. – Vol. 12, No. 4. – Art. 508.

162. MRI Assessment of Geometric Microstructural Changes of White Matter in Infants With Periventricular White Matter Injury and Spastic Cerebral Palsy / M. Wang,

H. Zhu, T. Huang [et al.] // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. – 2025. – Vol. 62, No. 2. – P. 403-414.

163. Multi-Metric Approach for the Comparison of Denoising Techniques for Resting-State fMRI / F. Goffi, A. M. Bianchi, G. Schiena [et al.] // *Human Brain Mapping*. – 2025. – Vol. 46, No. 7. – Art. e70080.

164. Multimodal precision MRI of the individual human brain at ultra-high fields / D. G. Cabalo, I. R. Leppert, R. Thevakumaran [et al.] // *Scientific Data*. – 2025. – Vol. 12, No. 1. – Art. 526.

165. Muscle fatigue during spinal stimulation and resistive ankle exoskeleton use in children with cerebral palsy / C. R. DeVol, V. M. Landrum, S. R. Shrivastav [et al.] // *medRxiv [Preprint]*. – 2025.

166. Muscle fatigue during spinal stimulation and resistive ankle exoskeleton use in children with cerebral palsy / C. R. DeVol, V. M. Landrum, S. R. Shrivastav [et al.] // *medRxiv [Preprint]*. – 2025.

167. Mutations disrupting neuritogenesis genes confer risk for cerebral palsy / S. C. Jin, S. A. Lewis, S. Bakhtiari [et al.] // *Nature Genetics*. – 2020. – Vol. 52, No. 10. – P. 1046-1056.

168. Natural history of cerebral visual impairment in children with cerebral palsy / J. Galli, E. Loi, S. Calza [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025. – Vol. 67, No. 4. – P. 486-495.

169. Neural Correlates of Mobility in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review / I. P. Sudati, D. Damiano, G. Rovai, A. C. de Campos // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2024. – Vol. 21, No. 8. – Art. 1039.

170. Neurodevelopmental outcomes of very preterm and very-low-birthweight infants / A. Pascal, G. Naulaers, E. Ortibus [et al.] // *European Journal of Paediatric Neurology*. – 2020. – Vol. 28. – P. 133-141.

171. Neuroimaging Patterns and Function in Cerebral Palsy—Application of an MRI Classification / K. Himmelmann, V. Horber, E. Sellier [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 617740.

172. Neuromuscular impairments of cerebral palsy: contributions to gait

abnormalities and implications for treatment / K. Clewes, C. Hammond, Y. Dong [et al.] // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2024. – Vol. 18. – Art. 1445793

173. Neuroprotection for neonatal hypoxic-ischemic encephalopathy: A review of novel therapies evaluated in clinical studies / N. H. Chan, C. C. Hawkins, B. V. Rodrigues [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025. – Vol. 67, No. 5. – P. 591-599.

174. Neuroprotective therapies in the NICU in preterm infants: present and future / E. J. Molloy, M. El-Dib, J. Soul [et al.] // *Pediatric Research*. – 2024. – Vol. 95, No. 5. – P. 1224-1236.

175. Objectively Diagnosed Diffuse White Matter Abnormality at Term Is an Independent Predictor of Cognitive and Language Outcomes in Infants Born Very Preterm / N. A. Parikh, L. He, V. S. Illapani [et al.] // *Journal of Pediatrics*. – 2020. – Vol. 220. – P. 56-63.

176. Outcomes and standardized tools in telehealth physical therapy for children with cerebral palsy: A scoping review using the ICF framework / I. S. Christovão, P. S. C. Chagas, A. A. V. Aniceto [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2025.

177. Persistent Inflammation in Cerebral Palsy: A Scoping Review / M. C. B. Paton, M. Finch-Edmondson, R. C. Dale [et al.] // *Journal of Clinical Medicine*. – 2022. – Vol. 11, No. 24. – Art. 7368.

178. Physiological Confounds in BOLD-fMRI and Their Correction / A. Addeh, R. J. Williams, A. Golestani [et al.] // *NMR in Biomedicine*. – 2025. – Vol. 38, No. 7. – Art. e70076.

179. Postneonatal Cerebral Palsy in Europe: Prevalence and Clinical Characteristics According to Contributory Events: An SCPE Study / M. Delobel-Ayoub, V. Ehlinger, D. Klapouszczak [et al.] // *Paediatric and Perinatal Epidemiology*. – 2025. – Vol. 39, No. 3. – P. 287-298.

180. Predictive and diagnostic measures for kernicterus spectrum disorder: a prospective cohort study / R. Gelineau-Morel, F. Usman, S. Shehu [et al.] // *Pediatric Research*. – 2024. – Vol. 95, No. 1. – P. 285-292.

181. Preeclampsia and Cerebral Palsy in Offspring / M. Badagionis, T. N. Sargentanis, P. Pervanidou [et al.] // *Children*. – 2022. – Vol. 9, No. 3. – Art. 385.
182. Prenatal smoking, alcohol and caffeine exposure and offspring externalizing disorders: a systematic review and meta-analysis / E. Haan, K. E. Westmoreland, L. Schellhas [et al.] // *Addiction*. – 2022. – Vol. 117, No. 10. – P. 2602-2613.
183. Preterm white matter injury: ultrasound diagnosis and classification / T. Agut, A. Alarcon, F. Cabañas [et al.] // *Pediatric Research*. – 2020. – Vol. 87, No. Suppl. 1. – P. 37-49.
184. Prevalence of cerebral palsy and factors associated with cerebral palsy subtype: A population-based study in Belgium / E. Dhondt, B. Dan, F. Plasschaert [et al.] // *European Journal of Paediatric Neurology*. – 2023. – Vol. 46. – P. 8-23.
185. Prevalence of cerebral palsy and factors associated with cerebral palsy subtype: A population-based study in Belgium / E. Dhondt, B. Dan, F. Plasschaert [et al.] // *European Journal of Paediatric Neurology*. – 2023. – Vol. 46. – P. 8-23.
186. Progression of planovalgus deformity in patients with cerebral palsy / J. J. Min, S. S. Kwon, K. H. Sung [et al.] // *BMC Musculoskeletal Disorders*. – 2020. – Vol. 21, No. 1. – Art. 141.
187. Proxy- and self-report evaluation of quality of life in cerebral palsy: Using Spanish version of CPQOL for Children and adolescents / A. Aza, I. Riquelme, M. Gómez Vela, M. Badia // *Research in Developmental Disabilities*. – 2024. – Vol. 154. – Art. 104844.
188. Relationship among four functional classification systems / S. Unes, M. Tuncdemir, C. Ozal [et al.] // *Developmental Neurorehabilitation*. – 2022. – Vol. 25, No. 6. – P. 410-416.
189. Reproducibility of resting-state functional connectivity in healthy aging and brain injury: A mini-multiverse analysis / H. A. Mullin, C. M. Carpenter, A. P. Cwiek [et al.] // *Network Neuroscience*. – 2025. – Vol. 9, No. 3. – P. 1154-1175.
190. Resting state brain network segregation is associated with walking speed and working memory in older adults / S. D. Sato, V. A. Shah, T. Fettrow [et al.] // *NeuroImage*. – 2025. – Vol. 310. – Art. 121155.

191. Robot-assisted upper limb therapy for personalized rehabilitation in children with cerebral palsy: a systematic review / D. Cardone, D. Perpetuini, M. Di Nicola [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 1499249.
192. Sadowska, M. Cerebral Palsy: Current Opinions on Definition, Epidemiology, Risk Factors, Classification and Treatment Options / M. Sadowska, B. Sarecka-Hujar, I. Kopyta // *Neuropsychiatric Disease and Treatment*. – 2020. – Vol. 16. – P. 1505-1518.
193. Salomon, I. Neurobiological Insights Into Cerebral Palsy: A Review / I. Salomon // *Brain and Behavior*. – 2024. – Vol. 14, No. 10. – Art. e70065.
194. Scalable quality control on processing of large diffusion-weighted and structural magnetic resonance imaging datasets / M. E. Kim, C. Gao, N. R. Newlin [et al.] // *PLoS ONE*. – 2025. – Vol. 20, No. 8. – Art. e0327388.
195. Sharawat, I. K. Quality of Life and Its Association with Level of Functioning / I. K. Sharawat, P. K. Panda // *Neuropediatrics*. – 2022. – Vol. 53, No. 4. – P. 227-234.
196. Short-term BCI intervention enhances functional brain connectivity associated with motor performance in chronic stroke / K. A. Grigoryan, K. Mueller, M. Wagner [et al.] // *NeuroImage: Clinical*. – 2025. – Vol. 46. – Art. 103772.
197. Stability of the Gross Motor Function Classification System over time in children with cerebral palsy / M. Huroy, T. Behlim, J. Andersen [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2022. – Vol. 64, No. 12. – P. 1487-1493.
198. Structural and functional connectome relationships in early childhood / Y. Hong, E. Cornea, J. B. Girault [et al.] // *Developmental Cognitive Neuroscience*. – 2023. – Vol. 64. – Art. 101314. –
199. Structural brain correlates of balance control in children with cerebral palsy: baseline correlations and effects of training / N. P. T. Jacobs, M. M. van der Krogt, A. I. Buizer [et al.] // *Brain Structure and Function*. – 2025. – Vol. 230, No. 5. – Art. 67.
200. Structure of brain grey and white matter in infants with spastic cerebral palsy and periventricular white matter injury / C. Liu, Y. Peng, Y. Yang [et al.] // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2024. – Vol. 66, No. 4. – P. 514-522.
201. Study of the brain function characteristics in children with cerebral palsy

during walking using functional near-infrared spectroscopy / T. Zhang, G. Xu, Y. Chang [et al.] // *Neurophotonics*. – 2025. – Vol. 12, No. 2. – Art. 025004.

202. Study protocol for the Australasian Cerebral Palsy Musculoskeletal Health Network (AusCP MSK) prospective cohort study: early detection of musculoskeletal complications in young children with moderate to severe cerebral palsy (GMFCS III-V) / C. F. Munns, L. A. Bentley, R. N. Boyd [et al.] // *BMJ Open*. – 2025. – Vol. 15, No. 4. – Art. e095526.

203. Tegegne, K. T. Determinants of cerebral palsy in children: systematic review / K. T. Tegegne // *Sudan Journal of Paediatrics*. – 2023. – Vol. 23, No. 2. – P. 126-144.

204. Thalamic oscillatory dysrhythmia and disrupted functional connectivity in thalamocortical loops in perinatal stroke / A. Rogachov, H. L. Carlson, A. Robertson [et al.] // *Scientific Reports*. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – Art. 12542.

205. The Challenge of Diffusion Magnetic Resonance Imaging in Cerebral Palsy: A Proposed Method to Identify White Matter Pathways / O. Martinie, P. Karan, E. Traverse [et al.] // *Brain Sciences*. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – Art. 1386.

206. The efficacy of physical activity or exercise among individuals with cerebral palsy: An umbrella review of systematic reviews / M. M. Alhumaid, F. Y. I. Asiri, M. A. Said, J. A. Haegele // *Complementary Therapies in Medicine*. – 2025. – Vol. 93. – Art. 103228.

207. The Origin of the Cerebral Palsies: Contribution of Population-Based Neuroimaging Data / V. Horber, E. Sellier, K. Horridge [et al.] // *Neuropediatrics*. – 2020. – Vol. 51, No. 2. – P. 113-119.

208. The orthopaedic aspect of spastic cerebral palsy / V. C. Skoutelis, A. D. Kanellopoulos, V. A. Kontogeorgakos [et al.] // *Journal of Orthopaedics*. – 2020. – Vol. 22. – P. 553-558.

209. The Role of Neuroimaging and Genetic Analysis in the Diagnosis of Children With Cerebral Palsy / V. Horber, U. Grasshoff, E. Sellier [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2021. – Vol. 11. – Art. 628075.

210. Transcutaneous spinal cord stimulation neuromodulates pre- and postsynaptic inhibition in the control of spinal spasticity / K. Minassian, B. Freundl, P.

Lackner, U. S. Hofstoetter // *Cell Reports Medicine*. – 2024. – Vol. 5, No. 11. – Art. 101805.

211. Trends in Prevalence and Severity of Pre/Perinatal Cerebral Palsy Among Children Born Preterm From 2004 to 2010: A SCPE Collaboration Study / C. Arnaud, V. Ehlinger, M. Delobel-Ayoub [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2021. – Vol. 12. – Art. 624884.

212. Unravelling genetic etiology of cerebral palsy: findings from a Slovenian pediatric cohort / U. Arkar Silan, A. Trebše, J. Kovač [et al.] // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1615449.

213. Upadhyay, J. Cerebral palsy: Aetiology, pathophysiology and therapeutic interventions / J. Upadhyay, N. Tiwari, M. N. Ansari // *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*. – 2020. – Vol. 47, No. 12. – P. 1891-1901.

214. Utilizing multivariate pattern analysis to uncover the neurobiological underpinnings of communication disorders in children with bilateral spastic cerebral palsy: insights from morphological and structural connectivity changes / J. Hu, C. He, X. Li [et al.] // *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. – 2026. – Vol. 16, No. 1. – Art. 75.

215. Villamor, E. Changing trends in cerebral palsy prevalence: an opportunity to consider etiological pathways / E. Villamor // *Developmental Medicine and Child Neurology*. – 2022. – Vol. 64, No. 9. – P. 1054-1055.

216. Vitrikas, K. Cerebral Palsy: An Overview / K. Vitrikas, H. Dalton, D. Breish // *American Family Physician*. – 2020. – Vol. 101, No. 4. – P. 213-220.

217. Wearable neurotechnology systems for upper extremity rehabilitation in children with cerebral palsy: a scoping review / S. J. Burchfield, A. Shierk, C. Truong, R. Blankenship // *Frontiers in Neurology*. – 2025. – Vol. 16. – Art. 1663596.

218. White matter characteristics in children with cerebral palsy prior to selective dorsal rhizotomy: a multicenter diffusion tensor imaging study / W. Yuan, C. B. Stevenson, P. Moretti [et al.] // *Journal of Neurosurgery: Pediatrics*. – 2024. – Vol. 34, No. 3. – P. 268-277.

219. White matter lesions and DTI metrics related to various types of dysfunction

in cerebral palsy: A meta-analysis and systematic review / Y. Jiang, G. Liu, B. Deng [et al.] // PLoS ONE. – 2025. – Vol. 20, No. 1. – Art. e0312378.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список пациентов

№ п/п	Код пациента	№ и/б	№ п/п	Код пациента	№ и/б
1	СУБ1	97598/A25	36	СУБ36	30886/A25
2	СУБ2	61056/A24	37	СУБ37	93454/A23
3	СУБ3	21021/A24	38	СУБ38	51796/A23
4	СУБ4	74513/A24	39	СУБ39	45666/A23
5	СУБ5	16767/A25	40	СУБ40	67490/A24
6	СУБ6	78625/A23	41	СУБ41	36336/A22
7	СУБ7	67861/A22	42	СУБ42	18161/A22
8	СУБ8	59439/A24	43	СУБ43	88892/A24
9	СУБ9	27643/A24	44	СУБ44	97901/A24
10	СУБ10	96137/A24	45	СУБ45	49528/A25
11	СУБ11	60316/A23	46	СУБ46	40879/A24
12	СУБ12	77668/A22	47	СУБ47	41626/A24
13	СУБ13	93244/A22	48	СУБ48	90557/A24
14	СУБ14	69591/A25	49	СУБ49	46205/A22
15	СУБ15	58905/A23	50	СУБ50	79809/A24
16	СУБ16	28030/A22	51	СУБ51	32228/A24
17	СУБ17	92950/A23	52	СУБ52	66353/A25
18	СУБ18	38384/A22	53	СУБ53	13402/A22
19	СУБ19	22263/A24	54	СУБ54	48683/A25
20	СУБ20	11321/A24	55	СУБ55	29836/A25
21	СУБ21	15994/A25	56	СУБ56	16185/A22
22	СУБ22	42053/A25	57	СУБ57	22478/A23
23	СУБ23	83912/A25	58	СУБ58	70874/A24
24	СУБ24	76368/A23	59	СУБ59	43424/A24
25	СУБ25	20309/A23	60	СУБ60	97523/A25
26	СУБ26	28494/A23	61	СУБ61	98008/A24
27	СУБ27	74954/A22	62	СУБ62	10510/A24
28	СУБ28	76524/A25	63	СУБ63	39258/A24
29	СУБ29	53187/A25	64	СУБ64	46046/A23
30	СУБ30	68812/A23	65	СУБ65	91183/A23
31	СУБ31	66045/A23	66	СУБ66	97819/A24
32	СУБ32	55445/A24	67	СУБ67	84276/A22
33	СУБ33	46340/A22	68	СУБ68	23380/A24
34	СУБ34	87486/A24	69	СУБ69	86757/A23
35	СУБ35	63967/A23	70	СУБ70	16400/A23

71	СУБ71	43874/A24	112	СУБ112	10094/A22
72	СУБ72	30262/A25	113	СУБ113	73363/A24
73	СУБ73	66451/A22	114	СУБ114	52903/A24
74	СУБ74	36618/A24	115	СУБ115	61642/A24
75	СУБ75	93452/A23	116	СУБ116	94302/A24
76	СУБ76	30524/A24	117	СУБ117	64453/A24
77	СУБ77	28365/A24	118	СУБ118	27694/A22
78	СУБ78	86333/A24	119	СУБ119	93928/A22
79	СУБ79	34768/A25	120	СУБ120	96775/A25
80	СУБ80	45618/A22	121	СУБ121	72878/A22
81	СУБ81	13121/A23	122	СУБ122	95867/A23
82	СУБ82	77500/A25	123	СУБ123	36560/A25
83	СУБ83	68472/A24	124	СУБ124	10553/A22
84	СУБ84	67715/A24	125	СУБ125	37394/A23
85	СУБ85	11479/A25	126	СУБ126	20701/A23
86	СУБ86	62371/A24	127	СУБ127	52731/A22
87	СУБ87	69421/A22	128	СУБ128	83074/A22
88	СУБ88	66885/A23	129	СУБ129	73502/A24
89	СУБ89	58761/A25	130	СУБ130	54122/A24
90	СУБ90	27518/A22	131	СУБ131	39593/A25
91	СУБ91	43616/A25	132	СУБ132	76894/A25
92	СУБ92	80213/A23	126	СУБ126	20701/A23
93	СУБ93	24653/A25	127	СУБ127	52731/A22
94	СУБ94	96706/A25	128	СУБ128	83074/A22
95	СУБ95	94668/A24	129	СУБ129	73502/A24
96	СУБ96	76684/A25	130	СУБ130	54122/A24
97	СУБ97	74144/A25	131	СУБ131	39593/A25
98	СУБ98	34753/A25	132	СУБ132	76894/A25
99	СУБ99	52345/A25	133	СУБ133	36750/A23
100	СУБ100	59064/A24	134	СУБ134	70778/A22
101	СУБ101	37437/A22	135	СУБ135	61571/A24
102	СУБ102	50917/A22	136	СУБ136	89491/A24
103	СУБ103	58469/A23	137	СУБ137	73001/A23
104	СУБ104	32880/A24	138	СУБ138	32431/A24
105	СУБ105	88164/A23	139	СУБ139	75733/A22
106	СУБ106	68798/A25	140	СУБ140	59511/A23
107	СУБ107	96897/A24	141	СУБ141	38919/A25
108	СУБ108	58309/A23	142	СУБ142	83094/A22
109	СУБ109	41382/A23	143	СУБ143	11844/A23
110	СУБ110	22957/A23	144	СУБ144	73607/A25
111	СУБ111	33917/A22	145	СУБ145	95349/A23

146	СУБ146	73489/A22
147	СУБ147	39704/A25
148	СУБ148	77477/A22
149	СУБ149	45523/A25
150	СУБ150	93427/A22
151	СУБ151	93041/A24
152	СУБ152	88240/A24
153	СУБ153	23136/A23
154	СУБ154	53125/A22
155	СУБ155	91760/A22
156	СУБ156	48490/A25
157	СУБ157	57370/A23
158	СУБ158	19154/A23
159	СУБ159	81145/A25
160	СУБ160	87088/A23
161	СУБ161	63613/A25
162	СУБ162	25538/A23
163	СУБ163	80889/A22
164	СУБ164	16327/A25
165	СУБ165	51634/A24
166	СУБ166	34999/A25
167	СУБ167	49501/A24
168	СУБ168	61439/A23
169	СУБ169	13242/A25
170	СУБ170	93934/A25
171	СУБ171	94215/A22
172	СУБ172	31100/A25
173	СУБ173	55684/A22
174	СУБ174	92621/A24
175	СУБ175	14657/A22
176	СУБ176	15375/A22
177	СУБ177	68086/A22
178	СУБ178	43102/A22



МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДИАТРИЧЕСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России)
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2,
Тел.: (812)2950646,
E-mail: spb@gpmu.org; <http://www.gpmu.org>
ОКПО 01963226, ОГРН 1037804002389
ИНН/КПП 7802010020/780201001

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по лечебной работе федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет»
Министерства здравоохранения
Российской Федерации



доцент, к.м.н.

Ю.В. Петренко

«...15.»12.....2025 года

О ВНЕДРЕНИИ

в лечебно-диагностический процесс клиники и отделения лучевой диагностики с кабинетами компьютерной томографии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации результатов научной работы кандидатской диссертации на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта Тлизамовой Фатимы Альбековны.

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе:

заведующего отделением лучевой диагностики с кабинетами компьютерной томографии Малекова Д.А., врача-рентгенолога отделения, к.м.н. Дубицкого Д.Л., врача-рентгенолога отделения Новокшенова Д.Ю.,

удостоверяем, что результаты диссертационного исследования на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России Тлизамовой Фатимы Альбековны, внедрены в диагностический процесс отделения лучевой диагностики с кабинетами компьютерной томографии

Заведующий отделением лучевой диагностики
с кабинетами компьютерной томографии

Малеков Д.А.

Врач рентгенолог отделения:

Дубицкий Д.Л.

Врач рентгенолог отделения:

Новокшенов Д.Ю.

И.О. Главного врача клиники
ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России:

Скобелева К.В.



УТВЕРЖДАЮ:
Главный врач
Санкт-Петербургского государственного
бюджетного учреждения
здравоохранения «Детская городская
больница Святой Ольги»
Начинкина Татьяна Александровна

« 10 » ноября .2025 г.

А К Т о внедрении

В клиническую практику кабинета магнитно-резонансной томографии Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения здравоохранения «Детская городская больница Святой Ольги» результатов научной работы кандидатской диссертации на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта Тлизамовой Фатимы Альбековны

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе:

Заведующая кабинетом магнитно-резонансной томографии
К.м.н. Минькова Ирина Сергеевна

Врач-рентгенолог
К.м.н. Кукота Ульяна Александровна

удостоверяем, что результаты диссертационного исследования на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» Тлизамовой Фатимы Альбековны, аспиранта кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России внедрены в диагностическую работу кабинета магнитно-резонансной томографии

Заведующая кабинетом магнитно-резонансной томографии
К.м.н. Минькова Ирина Сергеевна

Врач кабинета магнитно-резонансной томографии
К.м.н. Кукота Ульяна Александровна



МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПЕДИАТРИЧЕСКИЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Министерства здравоохранения Российской Федерации
(ФГБОУ ВО СПбГПМУ Минздрава России)
194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2,
Тел.: (812)2950646,
E-mail: spb@gpmu.org; <http://www.gpmu.org>
ОКПО 01963226, ОГРН 1037804002389
ИНН/КПП 7802010020/780201001

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по учебной работе
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
педиатрический медицинский университет»
Министерства здравоохранения
Российской Федерации
д.м.н. профессор

В.И. Орел

.....2025 года



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

в учебный процесс кафедры современных методов диагностики и радиолучевой терапии им. профессора С.А. Рейнберга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации результатов научной работы аспиранта Тлизамовой Фатимы Альбековны на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма»

Мы, нижеподписавшиеся, комиссия в составе:

- заведующего кафедрой: д.м.н., проф. Рязанова В.В.
- профессора кафедры: д.м.н. Марченко Н.В.

удостоверяем, что результаты диссертационного исследования на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России Тлизамовой Фатимы Альбековны внедрены на кафедре современных методов диагностики и радиолучевой терапии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Минздрава России в лекцию «МРТ в диагностике изменений головного мозга при ДЦП», а также практическое занятие «Методики комплексной МРТ головного мозга при обследовании детей с различными формами ДЦП»

Заведующий кафедрой
д.м.н., профессор

Рязанов В.В.

Профессор кафедры
д.м.н.

Марченко Н.В.

24.10.25

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель Генерального директора по научной работе
ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
академик РАН Конради А.О.

23.12.2025

А К Т О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНОЙ РАБОТЫ В КЛИНИЧЕСКУЮ ПРАКТИКУ

1. Наименование предложения: Разработка методики комплексной МРТ головного мозга для одновременного получения данных о структурных и функциональных изменениях у пациентов с ДЦП до и после применения нейрореабилитационного костюма.
2. Краткая аннотация: Предоставление усовершенствованного МРТ-протокола головного мозга при обследовании пациентов с ДЦП, применение которого позволяет получить признаки структурных изменений и нарушения функциональных связей между различными структурами и сетями головного мозга. Для выявления функциональных изменений головного мозга выполняли фМРТ в покое с применением импульсных последовательностей GRE Field Mapping (для картирования полей головного мозга) и BOLD (оценивать уровень нейрональной активности).
3. Эффект от внедрения: Информация, полученная при применении нового способа диагностики о состоянии коннектома у детей с ДЦП до и после применения нейрореабилитационного костюма, путем выполнения функциональной МРТ головного мозга в покое, объективно отражает изменения функциональной связности между структурами мозга и может использоваться в качестве метода контроля эффективности проведенной терапии.
4. Место и время использования предложения: Отделение магнитно-резонансной томографии Университетской клиники ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
5. Форма внедрения: Разработаны МРТ-протоколы головного мозга у пациентов с ДЦП для определения структурных и функциональных (с построением коннектома) изменений головного мозга
6. Название темы научно-квалификационной работы (диссертации): «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма»

Автор: Тлизова Ф.А. – очный аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России

Руководитель подразделения – базы внедрения:

Заведующий отделением магнитно-резонансной томографии ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
Врач-рентгенолог Рыжков А.В.

Главный врач ГБУЗ «Детский городской
многопрофильный клинический центр
высоких медицинских технологий им. К.А.
Раухфуса»

12» 11.....2025 года



в клиническую практику отделения лучевой диагностики ГБУЗ «Детский городской многопрофильный клинический центр высоких медицинских технологий им. К.А. Раухфуса» результатов научной работы кандидатской диссертации на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта Тлизамовой Фатимы Альбековны

Врач отделения к.м.н. Семенова Елена Сергеевна

удостоверяем, что результаты диссертационного исследования на тему: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма» аспиранта кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России Тлизамовой Фатимы Альбековны внедрены в клиническую практику отделения лучевой диагностики.

Семенова Елена Сергеевна

Акт о внедрении результатов научно-квалификационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института медицинского образования
ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
К.м.н., доцент

23.12.2026

Пармон Е.В.

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

1. Наименование предложения: проведение лекций, практических занятий и семинаров по теме: «Методы нейровизуализации в диагностике изменений головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом»
2. Краткая аннотация: применение методики комплексной МРТ позволяет выявить структурные и функциональные изменения головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом»
3. Эффект от внедрения: формирование новых компетенций, необходимых для самостоятельной профессиональной деятельности врача-специалиста по вопросам применения МРТ в диагностике заболеваний головного мозга
4. Место использования предложения: кафедра лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой, кафедра неврологии с клиникой лечебного факультета ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России.
5. Форма внедрения: внедрение результатов в виде лекции («МРТ-диагностика изменений головного мозга при детском церебральном параличе»), практического занятия («Особенности применения различных методик МРТ для определения изменений головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом»), а также семинара («Современное состояние вопроса диагностики изменений головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом») по Программе подготовки кадров в ординатуре по специальностям «Рентгенология» и «Неврология»
6. Название темы научно-квалификационной работы: «Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом до и после применения нейрореабилитационного костюма»

Очный аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой лечебного факультета ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
Тлизамова Ф.А.

Руководитель базы внедрения:

Заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой ИМО ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
д.м.н., профессор

Труфанов Г.Е.

Заместитель директора ИМО по учебной и методической работе, декан лечебного факультета ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова» Минздрава России
д.м.н., доцент

Кухарчик Г.А.