

МЕДИЦИНСКАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ

MEDICAL IMAGING

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
ORIGINAL ARTICLE

<https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.2.MIM.1>
УДК 616.831-009.11-053.2-073.756.8:615.851.83



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНАЯ ТОМОГРАФИЯ В ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЙ КОННЕКТОМА ГОЛОВНОГО МОЗГА У ДЕТЕЙ С ЦЕРЕБРАЛЬНЫМ ПАРАЛИЧОМ ПОСЛЕ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИОННОГО КОСТЮМА «REFORMA-ТЭКТ»

Ф.А. Тлизамова¹, А.Ю. Ефимцев¹, Г.Е. Труфанов¹, Д.С. Чегина¹, И.С. Палеева¹,
А.М. Климович¹, А.П. Кочетова², М.Б. Скворцова²

¹Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова, ул. Аккуратова, д. 2, г. Санкт-Петербург, 197341, Россия
²Школа № 627 Невского района Санкт-Петербурга, ул. Новосёлов, д. 11, г. Санкт-Петербург, 193079, Россия

Резюме. *Актуальность.* Церебральный паралич является ведущей причиной первичной инвалидности среди заболеваний нервной системы в Российской Федерации согласно данным ФГБУ «Федеральное бюро медико-социальной экспертизы» Минтруда России. Функциональная МРТ в состоянии покоя (фМРТп) представляет собой современный метод нейровизуализации, позволяющий идентифицировать функциональные изменения в коннектопе головного мозга у детей с церебральным параличом и отслеживать их реорганизацию в процессе нейрореабилитации. Это имеет критическое значение для разработки эффективных стратегий лечения и программ медико-социальной реабилитации. *Цель исследования:* оценить потенциал функциональной МРТ в состоянии покоя как инструмента для анализа терапевтической эффективности нейрореабилитационных мероприятий с использованием специализированного костюма «Reforma-ТЭКТ». *Объект и методы.* Исследование выполнено на МР-томографе с напряжённостью магнитного поля 1,5 Тесла. Проанализированы изменения функциональной связанности рабочих сетей покоя головного мозга у 30 пациентов с церебральным параличом до и после курса реабилитации с применением нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ». *Результаты.* Межгрупповой статистический анализ выявил у всех 30 пациентов с церебральным параличом достоверные различия ($p < 0,05$) в функциональной коннективности сети пассивного режима работы мозга по сравнению с контрольной группой. В динамике зафиксировано усиление функциональной связанности между медиальной префронтальной корой, лингвальной рабочей сетью (нижняя лобная извилина слева), фронтопариетальной корой справа и средней лобной извилиной справа. Одновременно наблюдалось снижение коннективности с компонентами рабочей сети внимания. *Заключение.* Применение функциональной МРТ в состоянии покоя у пациентов с детским церебральным параличом обеспечивает возможность детекции изменений в коннектопе головного мозга. При корректном методологическом подходе данная технология нейровизуализации может служить объективным инструментом мониторинга эффективности терапевтических мероприятий. Результаты, полученные в ходе исследования, способствуют совершенствованию реабилитационных стратегий для пациентов, проходящих лечение последствий перинатального поражения центральной нервной системы.

Ключевые слова: Церебральный паралич [D002547]; Функциональная магнитно-резонансная томография [D050428]; Коннектом [D000077239]; Головной мозг [D001921]; Дети [D002648]; Нейрореабилитация [D000071939]; Реабилитационные устройства [D019651]; Динамическая проприоцептивная коррекция [D000076417]; Нейропластичность [D055594]; Моторная функция [D009049]; Реабилитационная медицина [D012046]; Нейровизуализация [D055426]; Детский церебральный паралич [D002547 + D010372]; Функциональная связанность [D056228]; Лечебные костюмы [D005695 + D019651].

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проводилось без спонсорской поддержки.

Соответствие нормам этики. Авторы подтверждают, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо.

Для цитирования: Тлизамова Ф.А., Ефимцев А.Ю., Труфанов Г.Е., Чегина Д.С., Палеева И.С., Климович А.М., Кочетова А.П., Скворцова М.Б. Функциональная магнитно-резонансная томография в оценке изменений коннектома головного мозга у детей с церебральным параличом после применения нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ». *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: Реабилитация, Врач и Здоровье.* 2025;15(2):189–197. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.2.MIM.1>



FUNCTIONAL MAGNETIC RESONANCE IMAGING IN THE ASSESSMENT OF CHANGES IN THE BRAIN CONNECTOME IN CHILDREN WITH CEREBRAL PALSY AFTER THE USE OF THE NEUROREHABILITATION SUIT «REFORMA-ТЭКТ»

Fatima A. Tlizamova¹, Aleksandr Yu. Efimtsev¹, Gennadiy E. Trufanov¹, Dar'ya S. Chegina¹, Irina S. Paleeva¹, Anastasiya M. Klimovich¹, Anna P. Kochetova², Mariya B. Skvortsova²

¹Almazov National Medical Research Center, 2, Akkuratova St., St. Petersburg, 197341, Russia

²School No. 627 of the Nevsky District of St. Petersburg, 11, Novoselov St., St. Petersburg, 193079, Russia

Abstract. *Background.* Cerebral palsy is the leading cause of primary disability among neurological diseases in the Russian Federation, according to the Federal Bureau of Medical and Social Expertise of the Ministry of Labor of Russia. Resting-state functional MRI (rs-fMRI) is a modern neuroimaging technique that allows identification of functional changes in the brain connectome of children with cerebral palsy and tracking their reorganization during neurorehabilitation. This is critically important for developing effective treatment strategies and medical-social rehabilitation programs. *Objective.* To evaluate the potential of resting-state functional MRI as a tool for analyzing the therapeutic efficacy of neurorehabilitation interventions using the specialized "Reforma-ТЭКТ" suit. *Object and methods.* The study was performed using a 1.5 Tesla MR scanner. Changes in the functional connectivity of resting-state brain networks were analyzed in 30 patients with cerebral palsy before and after rehabilitation with the "Reforma-ТЭКТ" neurorehabilitation suit. *Results.* Intergroup statistical analysis revealed significant differences ($p < 0.05$) in the functional connectivity of the default mode network in all 30 cerebral palsy patients compared to the control group. Dynamic assessment showed increased functional connectivity between the medial prefrontal cortex, lingual working network (left inferior frontal gyrus), right frontoparietal cortex, and right middle frontal gyrus. Simultaneously, decreased connectivity with components of the attention network was observed. *Conclusion.* The use of resting-state functional MRI in patients with cerebral palsy enables detection of changes in the brain connectome. With correct methodological approach, this neuroimaging technology can serve as an objective tool for monitoring therapeutic efficacy. The results obtained in this study contribute to improving rehabilitation strategies for patients undergoing treatment for the consequences of perinatal central nervous system damage.

Key words: Cerebral Palsy [D002547]; Functional Magnetic Resonance Imaging [D050428]; Connectome [D000077239]; Brain [D001921]; Children [D002648]; Neurorehabilitation [D000071939]; Rehabilitation Devices [D019651]; Dynamic Proprioceptive Correction [D000076417]; Neuroplasticity [D055594]; Motor Function [D009049]; Rehabilitation Medicine [D012046]; Neuroimaging [D055426]; Pediatric Cerebral Palsy [D002547 + D010372]; Functional Connectivity [D056228]; Therapeutic Garments [D005695 + D019651].

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research received no external funding.

Compliance with ethical principles. The authors confirm that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary.

Cite as: Tlizamova F.A., Efimtsev A.Yu., Trufanov G.E., Chegina D.S., Paleeva I.S., Klimovich A.M., Kochetova A.P., Skvortsova M.B. Functional magnetic resonance imaging in the assessment of changes in the brain connectome in children with cerebral palsy after the use of the neurorehabilitation suit «Reforma-ТЭКТ». *Bulletin of the Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health.* 2025;15(2):189-197. <https://doi.org/10.20340/vmi-rvz.2025.2.MIM.1>

Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) – термин, описывающий группу хронических неврологических расстройств, характеризующихся стойкими двигательными и функциональными нарушениями ребенка в результате дизонтогенеза мозга или его повреждения в антенатальный и неонатальный периоды [1].

Термин «церебральный паралич» был впервые использован более 170 лет назад английским хирургом-ортопедом Уильямом Литтлом, который коррелировал трудные роды и неонатальную гипоксию со спастичностью конечностей и последовательными деформациями опорно-двигательного аппарата [2].

В Российской Федерации в 2023 г. первичная заболеваемость ДЦП у детей до 14 лет составила 209,4 на 100 тыс., в возрасте от 15 до 18 лет – 14,4 на 100 тыс. населения [3]. При ДЦП также нередко наблюдаются различные неврологические и психические расстройства, при этом их выраженность может варьировать от лёгких отклонений в эмоциональной сфере до тяжёлых интеллектуальных нарушений [4]. Таким образом, двигательные нарушения

при ДЦП могут сочетаться с умственной отсталостью, трудностями восприятия и обучения [5]. Иногда отмечаются патологические изменения со стороны зрения, слуха, чувствительности и различная патология со стороны внутренних органов, которые усугубляют степень задержки психомоторного развития [6].

В связи с этим особую актуальность приобретают как современные средства нейрореабилитации, так и методы объективной оценки их терапевтического эффекта, одним из которых на сегодняшний день является магнитно-резонансная томография в состоянии покоя (фМРТп).

Одним из новых направлений нейрореабилитации являются различные виды электростимуляции, такие как транскраниальная, чрескожная, транслингвальная и прочие [7].

Нейрореабилитационный костюм «Reforma-ТЭКТ» является одной из новейшей разработок в данной области, который представляет собой систему физиотерапевтической чрескожной электрической нейромюостимуляции. Метод основан на постоянной

стимуляции нервной системы, активируя мозг и иницируя процессы нейропластичности [8].

В современной детской неврологии растёт интерес к изучению патогенетических и нейрофизиологических механизмов, связанных с двигательными нарушениями при ДЦП, а также к исследованию процессов нейропластичности на фоне проводимого лечения, что стало более доступно благодаря прогрессу в методах нейровизуализации, которые позволяют не только обнаруживать функциональные изменения в коннектоме головного мозга, но и отслеживать динамику их изменений в процессе нейрореабилитации. На основе этих данных можно определить механизмы, способствующие улучшению моторики и координации движений у детей с ДЦП, что имеет значительное клиническое значение для повышения эффективности лечения [9].

Функциональная магнитно-резонансная томография является одной из ведущих методик картирования функциональных зон головного мозга в виду своей неинвазивности, отсутствия лучевой нагрузки и относительно широкой распространённости [10].

Суть данной методики заключается в измерении гемодинамических изменений в ответ на нейрональную активность (BOLD- эффект) [11]. Наиболее часто используемым на данный момент вариантом функциональной МРТ у детей является её выполнение в состоянии покоя, то есть без применения внешних стимулов [12].

Основным преимуществом фМРТ является её способность выявить функциональную связность без необходимости выполнения задачи, что делает её особенно полезной для изучения групп населения, которым может быть сложно проводить фМРТ на основе задач, таких как дети, пожилые люди или люди с тяжёлыми когнитивными нарушениями [13].

Функциональная МРТ покоя позволяет оценить функциональные связи (коннективность) в так называемых сетях покоя головного мозга, важнейшей из которых является сеть пассивного режима работы мозга (СПРРМ), включающая медиальную префронтальную кору (МПФК), кору задней части поясной извилины и предклинье. СПРРМ регулирует протекание когнитивных процессов: памяти, внимания, эмоций [14].

Изучение механизмов нейропластичности при ДЦП и определение изменений коннектома на фоне лечения представляют собой важные направления, которые способствуют разработке новых реабилитационных методов и прогнозированию течения заболевания [15].

В зарубежной литературе имеется несколько исследований, которые фокусируются на анализе функциональной активности сетей покоя головного мозга у пациентов с ДЦП [16, 17]. В Российской Фе-

дерации существуют лишь единичные работы, посвящённые оценке эффективности нейрореабилитации у детей с ДЦП с использованием фМРТ [18]. Всё вышеперечисленное свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в данной области для совершенствования методов реабилитации и мониторинга терапии у этой категории пациентов.

Цель исследования: анализ возможностей функциональной МРТ в состоянии покоя для оценки терапевтического эффекта нейрореабилитационных мероприятий после использования специализированного костюма-тренажёра «Reforma-ТЭКТ».

Костюм-тренажёр «Reforma-ТЭКТ» допущен к использованию на территории Российской Федерации. Об этом свидетельствует регистрационное удостоверение №РЗН 2020/11530 от 13 августа 2020 года, выданное Росздравнадзором. (<https://nevacert.ru/reestr/med-reestr/rzn-202011530-40799/maket?ysclid=m79b90gi1667975292> или РЗН 2020/11530)

Объект и методы

В исследовании участвовало 30 пациентов с ДЦП, форма – спастическая диплегия. Средний возраст составил 8 ± 3 года (от 4 до 15 лет). Все дети прошли предварительный отбор и оценку физического состояния; имели сохраненный интеллект и не имели судорожной активности в анамнезе, т.к. она является абсолютным противопоказанием для проведения электростимуляции. Каждому пациенту было проведено комплексное обследование, которое включало неврологическое тестирование, электроэнцефалографию (ЭЭГ) и МРТ. Магнитно-резонансная томография проводилась на томографе с индукцией магнитного поля 1,5 Тл и включала в себя нативное стандартное сканирование (для оценки структурных изменений головного мозга) и фМРТ в покое. Исследования были проведены до начала курса нейрореабилитации (первая временная точка) и после его завершения (вторая временная точка).

Нейрореабилитация включала использование нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ» – системы физиотерапевтической чрескожной электрической нейромиостимуляции. В настоящее время существует широкий выбор костюмов. Первые модели были вдохновлены «Пингвинским костюмом», новшеством из советской космической программы 1960-х годов [19]. В данном исследовании используется термально-электроимпульсный костюм-тренажёр («Reforma-ТЭКТ»), предназначенный для регуляции мышечного тонуса, тренировки различных групп мышц, комплексной функциональной подготовки и адаптации к спортивным физическим нагрузкам (рис. 1).

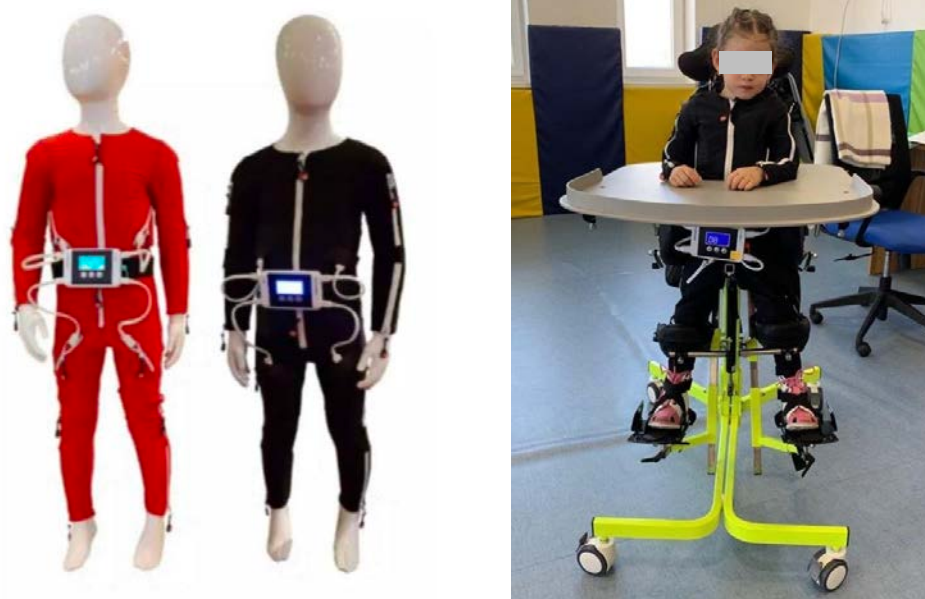


Рисунок 1. Костюм «Reforma-ТЭКТ»
Figure 1. Suit "Reforma-ТЭКТ"

В костюме реализуется принцип реципрокного торможения, то есть при сокращении мышцы, мышцы-антагонисты будут расслабляться, а не противодействовать движению. Следовательно, через стимуляцию антагонистических мышц уменьшается спастичность. На костюме закреплены 58 электростимулирующих электродов, благодаря их расположению (попарно над каждой группой мышц) можно индивидуально рассчитать и выбрать место стимуляции. Действие костюма связано с прямым воздействием на проприоцепторы мышц и суставов и одновременной коррекцией афферентного вестибуло-проприоцептивного потока на центральные структуры областей мозга моторного контроля. Моторная афферентация оказывает глубокое активирующее действие на человеческий мозг: поток проприоцептивных стимулов изменяет функциональные свойства нейронов, превращает их в полимодальные нейроны и обеспечивает им повышенную восприимчивость к стимулам различных сенсорных модальностей. Костюм имеет систему эластичных нагрузочных элементов, которые распределены в соответствии с топографией мышц-антагонистов [20].

Пациенты использовали костюм в течение 1 месяца, по 1 часу 5 дней в неделю.

Для оценки двигательного развития, способности удержания позы сидя, функции сохранения рук, постурального контроля, мышечного тонуса, амплитуды движений в суставах и коммуникативного уровня использовались следующие шкалы и методы: MACs (шкала функции сохранения рук); SATCo (шкала оценки постурального контроля); Ashworth Scale (шкала оценки мышечного тонуса); Гониометрия (метод исследования амплитуды движений в суставах).

Методика МРТ головного мозга

МРТ головного мозга состояла из применения традиционных импульсных последовательностей с получением изображений в трёх взаимно перпендикулярных плоскостях (T1-, T2-, TIRM, MPRAGE), а также выполнения фМРТ в состоянии покоя (табл. 1).

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

Table 1. Parameters and values of the pulse sequence when performing functional MRI of the brain

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

Во время выполнения фМРТп испытуемым даётся инструкция не спать, максимально расслабиться и стараться не думать о чем-то конкретном. Исследование проводилось без наркоза, без седации.

Родители всех пациентов подписывали информированное согласие.

Исследование выполнено с согласия Этического комитета ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России (выписка № 1610-23 из протокола заседания ЛЭК № 10-23 от 02 октября 2023 г.).

Постпроцессинговую обработку полученных МР-данных проводили с помощью специализированного

программного обеспечения (MatLab, CONN-TOOLBOX). Обработка данных фМРТп представляет собой анализ изменения амплитуды BOLD-сигнала от каждого вокселя на протяжении времени сканирования с дальнейшим вычислением корреляций полученных временных кривых с целью выявить синхронные и асинхронные колебания, отражающие функциональную связность соответствующих зон.

При синхронной активации различных отделов головного мозга, эти отделы считаются положительно функционально связанными друг с другом, при асинхронной активации – отрицательно функционально связанными.

Существует множество рабочих сетей головного мозга и различные методы их оценки. В данном исследовании мы применяли анализ на основе выбора зоны интереса.

Результаты и их обсуждение

После курса применения нейрореабилитационного костюма у всех детей было отмечено клиническое улучшение координации движений и снижение мышечного тонуса, что подтверждалось данными неврологического исследования ($p < 0,05$).

При применении различных шкал получены следующие результаты (табл. 2).

Таблица 2. Применяемые шкалы и полученные результаты
Table 2. Scales used and results obtained

Шкалы	Результаты
MACs	Улучшение показателей по шкале оценки мануальных способностей у 56% исследуемых
SATCo	Улучшение показателей по шкале оценки постурального контроля у 100% исследуемых
Ashworth Scale	Улучшение показателей по шкале оценки мышечного тонуса в нижних конечностях у 100% исследуемых, в верхних конечностях у 72% исследуемых
Гониометрия	Улучшение показателей по гониометрии по показателям тыльного сгибания ГС (при согнутом КС и разогнутом КС) у 75% исследуемых. Улучшение показателей по гониометрии по показателям отведения в ТБС (при согнутом КС и разогнутом КС) у 100% исследуемых. Улучшение показателей по гониометрии по показателям сгибания/разгибания в КС у 63% исследуемых

Из данных таблицы 2 следует, что определено улучшение показателей по шкале оценки постурального контроля (SATCo) у всех исследуемых, также можно говорить об улучшении функционирования сенсомоторной системы, в том числе её осознанных компонентов.

Улучшение показателей по шкале оценки мануальных способностей (MACs) отмечено у 56% исследуемых, может указывать на повышение качества направленных сенсомоторных действий, в том числе в системе «зрение-рука».

Улучшение показателей по шкале оценки мышечного тонуса (Ashworth Scale) в нижних конечностях выявлено у всех исследуемых, в верхних конечностях – в 72% случаев, а также улучшение показателей по гониометрии: по показателям тыльного сгибания голеностопного сустава (при согнутом коленном суставе и разогнутом суставе) у 75% пациентов; по показателям отведения в тазобедренном суставе (при согнутом коленном суставе и разогнутом суставе) – у всех исследуемых; по показателям сгибания/разгибания в коленном суставе – у 63% детей, что может свидетельствовать о стабилизации функционирования компонентов сети пассивного режима работы мозга и восстановлении связи между медиальной префронтальной корой, лингвальной рабочей сетью (нижняя лобная извилина слева), фронтопариетальной корой справа, средней лобной извилиной справа.

Таким образом, на фоне проводимой нейрореабилитации, отмечается нормализация мышечного тонуса; увеличение трофики и оксигенации тканей; повышение работоспособности; расслабление дыхательной мускулатуры, что приводит к удлинению речевого выдоха и улучшению артикуляции.

По результатам анализа фМРТ в состоянии покоя у пациентов с ДЦП до и после нейростимуляции были выявлены изменения функциональной связности головного мозга при проведении межгруппового статистического анализа ($p < 0,05$) (ROI-to-ROI и Seed-to-Voxel). Исследовалась реорганизация нейронных сетей в состоянии покоя, играющих ключевую роль в поддержании моторных функций и контроле спастичности, а именно:

- сеть пассивного режима работы мозга (Default mode network, DMN), которая объединяет предклинье, заднюю часть поясной извилины, латеральную теменную и медиальную префронтальную кору;
- соматосенсорные сети, которые включают первичную высшую моторную и сенсорную области;
- зона Брока, ответственная за понимание и имитацию произвольных движений, что лежит в основе формирования любых двигательных навыков;
- сеть выявления значимости, роль которой заключается в интеграции сенсорной информации, обработке внутренних и внешних значимых стимулов, и принятия решения, а также в переключении между различными динамическими состояниями мозга.

При анализе данных функциональной МРТ при выполнении межгруппового статистического анализа (two-sample t-test, сравнение состояния покоя до и после курса нейрореабилитации) с выбором сенсомоторной области левого полушария в качестве зоны интереса определена положительная динамика в виде усиления связности как со структурами мозжечка, так и с контрлатеральным полуша-

рием, аперкулярной корой, с параингулярной корой (поясной извилиной), лобной корой, с подкорковыми структурами частично (бледный шар) (рис. 2), что клинически проявлялось улучшением координации движений глаз, головы и конечностей.

Определяется статистически значимое усиление коннективности между сенсомоторной зоной как справа, так и слева и передними отделами поясной извилины, медиальной фронтальной корой, которая является, по сути, компонентом большой рабочей сети покоя головного мозга ($p < 0,05$) (рис. 3).

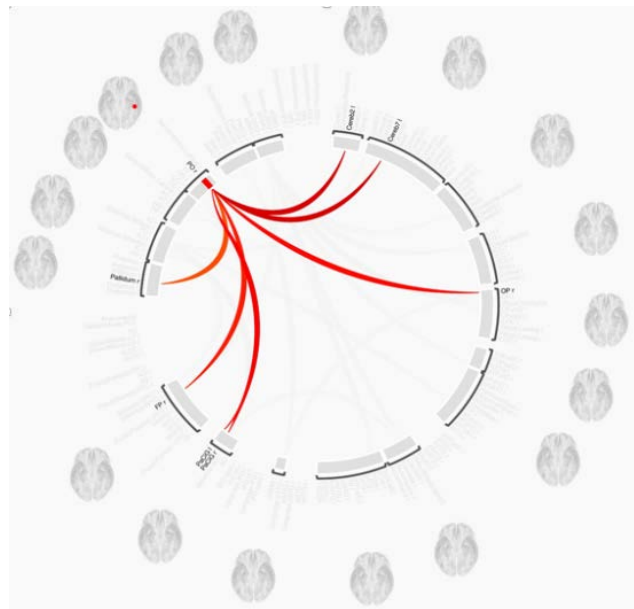
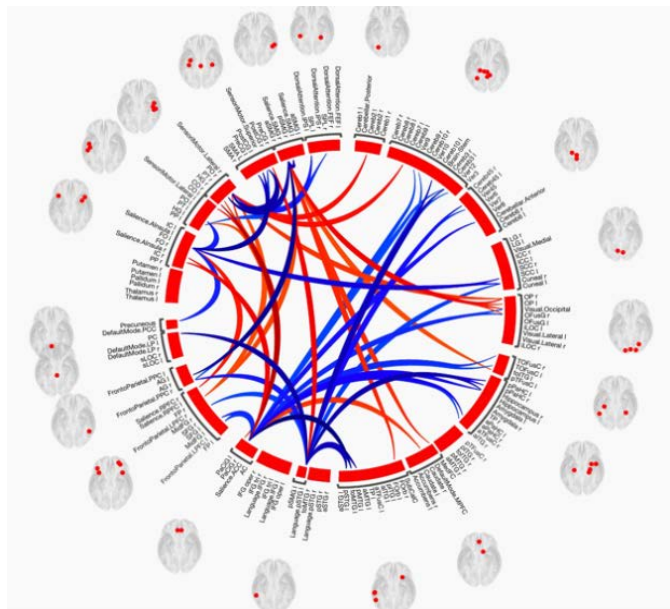


Рисунок 2. Коннектограмма изменения функциональной коннективности между различными структурами головного мозга у пациентов с ДЦП до и после применения костюма «Reforma-ТЭКТ». Градация цвета отражает значение p FDR corr (градация красный-бордовый отражает усиление коннективности)

Figure 2. Connectogram of changes in functional connectivity between different structures of the brain in patients with cerebral palsy before and after using the Reforma-TEKT suit. The color gradation reflects the p FDR corr value (the red-burgundy gradation reflects increased connectivity)

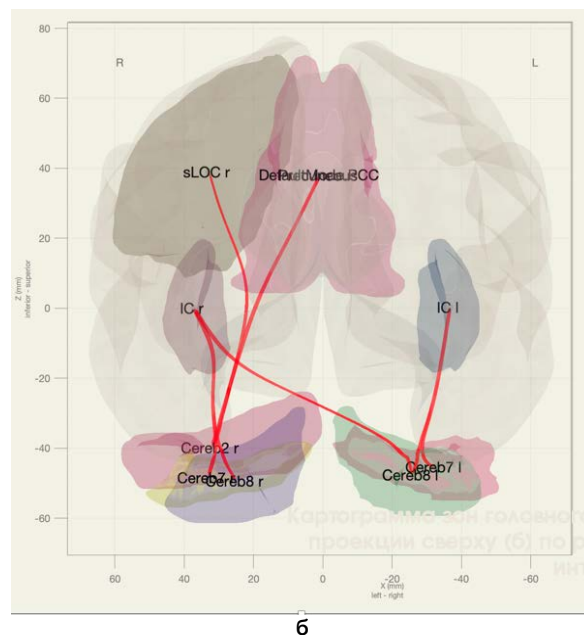
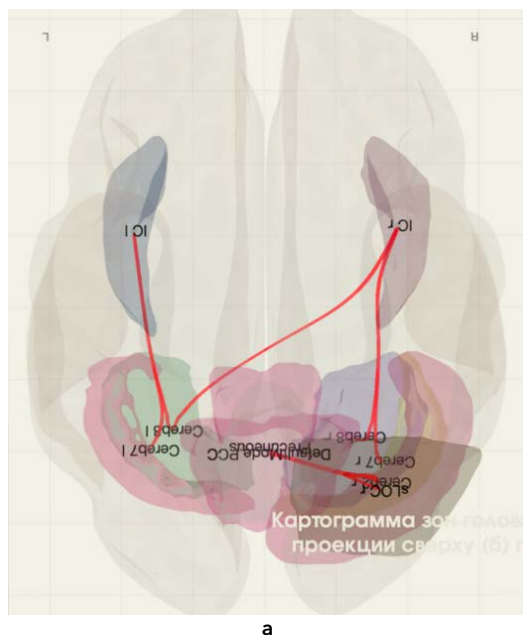


Рисунок 3. Картограмма зон головного мозга (а) и 3D-реконструкция проекции сверху (б) по результатам анализа всех зон интереса. Усиление коннективности между сенсомоторной зоной как справа, так и слева и передними отделами поясной извилины, медиальной фронтальной корой (выделено красным цветом)

Figure 3. Map of brain areas (a) and 3D reconstruction of the projection from above (b) based on the results of the analysis of all areas of interest. Increased connectivity between the sensorimotor area on both the right and left and the anterior cingulate cortex, medial frontal cortex (highlighted in red)

То есть речь идет о варианте нейропластичности, когда изменения функциональной связности не в конкретной зоне, а затрагивают несколько зон головного мозга.

Основные компоненты рабочих сетей головного мозга, которые продемонстрировали статистически значимое усиление связности, – это отделы мозжечка с островковой корой, а также с элементами рабочей сети покоя (предклинье, задний цингулюм).

Если говорить об оценке на основе выбора зон интереса, то такой зоной была медиальная префронтальная кора (mPFC), которая входит в состав сети пассивного режима работы мозга (СПРРМ), и также включает в себя кору задней части поясной извилины и предклинье. СПРРМ представляет собой динамическую систему, которая связана с различ-

ными областями головного мозга и выполняет множество функций, затрагивая когнитивные процессы, память, внимание, регуляцию эмоций.

Исследования с использованием фМРТ показали, что медиальная префронтальная кора (mPFC), в частности передняя медиальная префронтальная кора (amPFC), может модулировать мимическое поведение [21].

У пациентов с ДЦП в динамике было установлено усиление связности, между медиальной префронтальной корой, лингвальной рабочей сетью (нижняя лобная извилина слева), фронтопариетальной корой справа, средней лобной извилиной справа. При этом было выявлено ослабление связности с компонентами рабочей сети внимания (рис. 4).

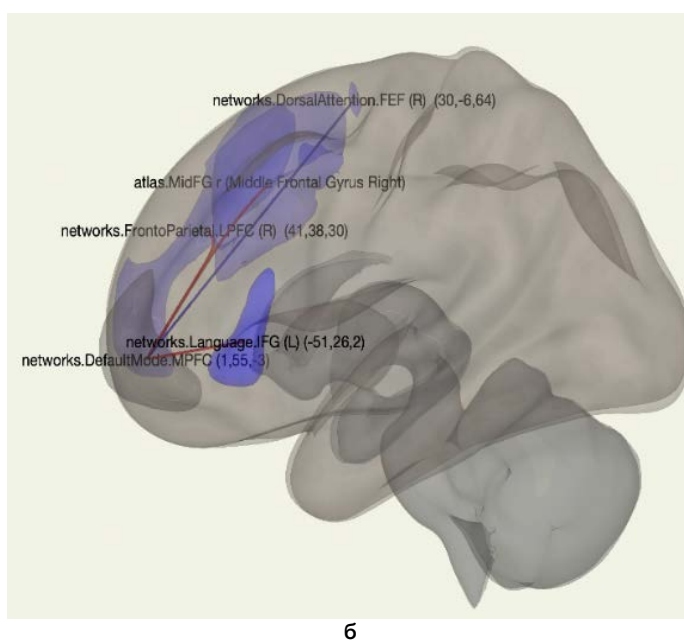
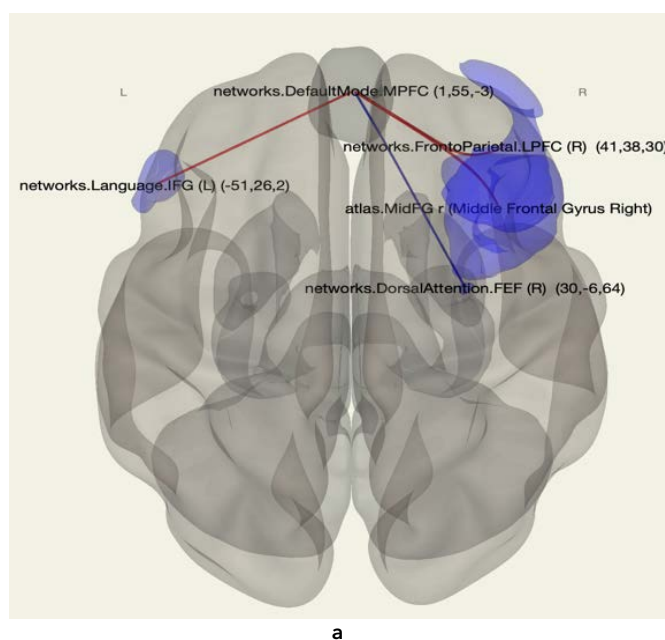


Рисунок 4. 3D-реконструкция в аксиальной (а) и сагиттальной (б) плоскостях. Показаны области статистически значимых различий: увеличение (красным цветом) и уменьшение (синим цветом) функциональной связности

Figure 4. 3D reconstruction in the axial (a) and sagittal (b) planes. Areas of statistically significant differences are shown: an increase (in red) and a decrease (in blue) in functional connectivity

При этом было выявлено ослабление связности медиальной префронтальной коры с компонентами рабочей сети внимания. Эти изменения отражают, вероятно, положительную динамику моторных навыков и некоторых когнитивных функций в рамках нейропластичности на фоне проводимой нейрореабилитации.

В результате проведенного исследования доказано, что применение костюма «Reforma-ТЭКТ» способствует улучшению показателей двигательного развития, нормализации мышечного тонуса, увеличению трофики и оксигенации тканей, повышению работоспособности, а также расслаблению дыхательной мускулатуры, что приводит к удлинению речевого выдоха и улучшению артикуляции.

Заключение

Магнитно-резонансная томография, включающая применение традиционных методик и функциональной МРТ покоя, является достоверным методом оценки функциональных изменений головного мозга у детей с ДЦП до и после проведения нейрореабилитации. Применение специального программного обеспечения (MatLab, CONN-TOOLBOX) позволяет проводить качественную и количественную оценку выявленных изменений и наглядно представлять их в графическом виде.

Проведение комплексной МРТ позволило получить одновременную информацию о локализации и

объёме функциональных изменений головного мозга у детей с ДЦП.

В динамике достоверно выявлено усиление коннективности между медиальной префронтальной корой, лингвальной рабочей сетью (нижняя лобная извилина слева), фронтопарietальной корой справа, средней лобной извилиной справа.

Было выявлено ослабление коннективности медиальной префронтальной коры с компонентами рабочей сети внимания – фронтальными полями глаз и задней теменной корой. Они являются основными анатомическими зонами сети, которые связаны между собой верхним продольным пучком.

Зона LIPV участвует в контроле внимания и движений глаз, важна при зрительно ориентированных действиях, например при дотягивании и указании, движениях рук.

Получены новые данные о динамике функциональной активности рабочих сетей головного мозга в группах пациентов с различной степенью эффективности терапии ДЦП. Применение нейрореабилитационного костюма «Reforma-ТЭКТ» усиливает эффективность стандартной двигательной реабилитации, что подтверждается данными функциональной МРТ покоя.

Литература [References]

- 1 Sudati I.P., Damiano D., Rovai G., de Campos A.C. Neural Correlates of Mobility in Children with Cerebral Palsy: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2024;21:1039. <https://doi.org/10.3390/ijerph21081039>
- 2 Федорущкина Н.А. Нутритивный статус детей со спастическими формами детского церебрального паралича. М., 2023. Fedorushkina N.A. Nutritional status of children with spastic forms of cerebral palsy. Moscow, 2023. (In Russ.).
- 3 Федеральная служба государственной статистики rosstat.gov.ru 2023. Federal State Statistics Service rosstat.gov.ru 2023 (In Russ.).
- 4 Vitrikas K, Dalton H, Breish D. Cerebral Palsy: An Overview. *Am Fam Physician*. 2020 Feb 15;101(4):213-220. PMID: 32053326
- 5 Stadskleiv K. Cognitive functioning in children with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2020 Mar;62(3):283-289. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14463>. Epub 2020 Jan 9. PMID: 32010976
- 6 Sadowska M, Sarecka-Hujar B, Kopyta I. Cerebral Palsy: Current Opinions on Definition, Epidemiology, Risk Factors, Classification and Treatment Options. *Neuropsychiatr Dis Treat*. 2020 Jun 12;16:1505-1518. <https://doi.org/10.2147/NDT.S235165>. PMID: 32606703; PMCID: PMC7297454.
- 7 Loffi R.G., Souto D.O., Cruz T.K.F., Lima A.F.B.d., Rocha F.R.M.C., Barreto S.R., Santana P.A.N., Nascimento A.A.A.C., Haase V.G. Narrative Review of the Theoretical-Methodological Foundations of the TREINI Program. *Children*. 2024;11:1181. <https://doi.org/10.3390/children11101181>
- 8 Литус А.Ю. Лучшие отечественные технические средства реабилитации. костюм-тренажер «REFORMA-ТЭКТ» © CMTR 2021. Litus A.Yu. The best domestic technical means of rehabilitation. training suit "REFORMA-TEKT" © CMTR 2021. (In Russ.).
- 9 Чегина Д.С. Магнитно-резонансная томография в оценке коннектома головного мозга у пациентов с детским церебральным параличом в поздней резидуальной стадии до и после транслингвальной нейростимуляции. М., 2022:129. Chegina D.S. Magnetic resonance imaging in assessing the brain connectome in patients with cerebral palsy in the late residual stage before and after translingual neurostimulation. Moscow, 2022:129. (In Russ.).
- 10 Amemiya S, Takao H, Abe O. Resting-State fMRI: Emerging Concepts for Future Clinical Application. *J Magn Reson Imaging*. 2024 Apr;59(4):1135-1148. <https://doi.org/10.1002/jmri.28894>. Epub 2023 Jul 9. PMID: 37424140.
- 11 Du Y, Fang S, He X, Calhoun VD. A survey of brain functional network extraction methods using fMRI data. *Trends Neurosci*. 2024 Aug;47(8):608-621. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2024.05.011>. Epub 2024 Jun 20. PMID: 38906797.!!!
- 12 Талабаев М.В., Соловьева А.Ю., Антоненко А.И., Апанасенко М.А. Эффективность разработанных парадигм при выполнении функциональной магнитно - резонансной томографии головного мозга у детей. *Медицинские новости*. 2022;5(332):73-76. Talabaev M.V., Solovieva A.Yu., Antonenko A.I., Apanasenko M.A. Efficiency of the developed paradigms in performing functional magnetic resonance imaging of the brain in children. *Medical news*. 2022;5(332):73-76. (In Russ.).
- 13 Hoyer R, Laureys S. The Interest and Usefulness of Resting State fMRI in Brain Connectivity Research. *Brain Connect*. 2024 Sep;14(7):354-356. <https://doi.org/10.1089/brain.2024.0052>. Epub 2024 Aug 7. PMID: 39078316.
- 14 Bukkiewa TA, Pospelova ML, Efimtsev AYU, Fionik OV, Alekseeva TA, Gorbunova EA, Krasnikova VV, Makhanova AM, Nikolaeva AE, Tonyan SN, Levchuk AG, Trufanov GE. Modern neuroimaging techniques in the assessment of changes in the brain connectome in patients with postmastectomy syndrome. *Russian Journal for Personalized Medicine*. 2022;2(1):73-82. (In Russ.). <https://doi.org/10.18705/2782-3806-2022-2-1-73-82>
- 15 Саломон И. Нейробиологические взгляды на церебральный паралич: обзор механизмов и терапевтических стратегий. *Поведение мозга*. 2024;14(10):e70065. Salomon I. Neurobiological perspectives on cerebral palsy: a review of mechanisms and therapeutic strategies. *Brain Behavior*. 2024;14(10):e70065. (In Russ.). <https://doi.org/10.1002/brb3.70065>. PMID: 39378294; PMCID: PMC11460637.
- 16 Boerwinkle VL, Sussman BL, de Lima Xavier L, Wyckoff SN, Reuther W, Kruer MC, Arhin M, Fine JM. Motor network dynamic resting state fMRI connectivity of neurotypical children in regions affected by cerebral palsy. *Front Hum Neurosci*. 2024 May 21;18:1339324. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2024.1339324>. PMID: 38835646; PMCID: PMC11148452.
- 17 Ashtiyani M, Moradi Birgani P, Soleimani M, Jameie SB, Shahrokhi A, Mirbagheri MM, Deevband MR. Corpus Callosum Functional Activities in Children with Cerebral Palsy. *J Biomed Phys Eng*. 2024 Feb 1;14(1):21-30. <https://doi.org/10.31661/jbpe.v0i0.2106-1354>. PMID: 38357606; PMCID: PMC10862116.
- 18 Чегина Д.С., Игнатова Т.С., Ефимцев А.Ю., Лепехина А.С., Левчук А.Г., Труфанов Г.Е. Функциональные изменения рабочих сетей покоя головного мозга у пациентов со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции. *Лучевая диагностика и терапия*. 2021;12(3):26-34. Chegina D.S., Ignatova T.S., Efimtsev A.Yu., Lepekhina A.S., Levchuk A.G., Trufanov G.E. Functional changes in the working resting networks of the brain in patients with spastic diplegia after translingual neurostimulation. *Radiation diagnostics and therapy*. 2021;12(3):26-34. (In Russ.).
- 19 Bar-Haim S., Harries N., Belokopytov M., Frank A., Copeliovitch L., Kaplanski J., Lahat E. Comparison of efficacy of Adeli suit and neurodevelopmental treatments in children with cerebral palsy. *Dev. Med. Child Neurol*. 2006;48:325-330. <https://doi.org/10.1017/S0012162206000727>

- 20 Мотанова Е., Бекренева М., Рукавишников И., Шигуева Т.А., Савеко А.А., Томиловская Э.С. Применение космических технологий, направленных на проприоцептивную коррекцию в наземной медицине в России. *Передний Физиол.* 2022;13:921862. Motanova E., Bekrenева M., Rukavishnikov I., Shigueva T.A., Saveko A.A., Tomilovskaya E.S. Application of space technologies aimed at proprioceptive correction in terrestrial medicine in Russia. *Peredniy Fiziol.* 2022;13:921862. (In Russ.). <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.921862>. PMID: 35784861; PMCID: PMC9243534.
- 21 Wang Y, Hamilton AF. Anterior medial prefrontal cortex implements social priming of mimicry. *Social Cognitive and Affective Neuroscience.* 2015;10(4):486–493. <https://doi.org/10.1093/scan/nsu076>. PMC 4381231. PMID 25009194

Авторская справка**Тлизамова Фатима Альбековна**

Аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова. fatima.albekovna@mail.ru

Вклад автора: методология, проведение исследования, верификация данных, анализ данных.

Ефимцев Александр Юрьевич

Д-р мед. наук, доцент кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0003-2249-1405; atralf@mail.ru

Вклад автора: разработка концепции исследования, постановка задач исследования, одобрение финальной версии перед публикацией.

Труфанов Геннадий Евгеньевич

Д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0002-1611-5000; trufanovge@mail.ru

Вклад автора: разработка концепции исследования, постановка задач исследования, одобрение финальной версии перед публикацией.

Чегина Дарья Сергеевна

Канд. мед. наук, врач-рентгенолог отделения МРТ, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова.

ORCID 0000-0002-7630-8242; dashachegina@gmail.com

Вклад автора: методология, проведение исследования, верификация данных, анализ данных.

Палеева Ирина Сергеевна

Ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова.

ORCID 0009-0005-0557-1990; paleewa.ir@yandex.ru

Вклад автора: методология, проведение исследования, верификация данных, анализ данных.

Климович Анастасия Михайловна

Ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации с клиникой Института медицинского образования, Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова.

ORCID 0009-0003-4957-7695; vargina.anast@yandex.ru

Вклад автора: методология, проведение исследования, верификация данных, анализ данных.

Кочетова Анна Павловна

Канд. пед. наук, директор школы № 627 Невского района Санкт-Петербурга.

A-h92@yandex.ru

Вклад автора: обзор публикаций по теме статьи, редактирование текста.

Скворцова Мария Борисовна

Заместитель директора по воспитательной работе ВР школы № 627 Невского района Санкт-Петербурга.

skvo_grimm@mail.ru

Вклад автора: обзор публикаций по теме статьи, редактирование текста.

Author's reference**Fatima A. Tlizamova**

Postgraduate student, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center.

fatima.albekovna@mail.ru

Author's contribution: methodology, conducting the study, data verification, data analysis.

Aleksandr Yu. Efimtsev

Dr. Sci. (Med.), Associate Professor Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic, Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center.

ORCID 0000-0003-2249-1405; atralf@mail.ru

Author's contribution: development of the study concept, formulation of study objectives, approval of the final version before publication.

Gennadiy E. Trufanov

Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic of the Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center.

ORCID 0000-0002-1611-5000; trufanovge@mail.ru

Author's contribution: development of the study concept, formulation of study objectives, approval of the final version before publication.

Dar'ya S. Chagina

Cand. Sci. (Med.), Radiologist, MRI Department, Almazov National Medical Research Center.

ORCID 0000-0002-7630-8242; dashachegina@gmail.com

Author's contribution: methodology, study implementation, data verification, data analysis.

Irina S. Paleeva

Resident, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with Clinic of the Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center. Almazova.

ORCID 0009-0005-0557-1990; paleewa.ir@yandex.ru

Author's contribution: methodology, conducting the study, data verification, data analysis.

Anastasiya M. Klimovich

Resident of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging with the Clinic of the Institute of Medical Education, Almazov National Medical Research Center.

ORCID 0009-0003-4957-7695; vargina.anast@yandex.ru

Author's contribution: methodology, conducting the study, data verification, data analysis.

Anna P. Kochetova

Cand. Sci. (Ped.), Principal of School No. 627 of the Nevsky District of St. Petersburg.

A-h92@yandex.ru

Author's contribution: review of publications on the topic of the article, text editing.

Mariya B. Skvortsova

Deputy Director for Educational Work of the VR School No. 627 of the Nevsky District of St. Petersburg.

skvo_grimm@mail.ru

Author's contribution: review of publications on the topic of the article, editing the text.