

## СТРУКТУРНАЯ РЕОРГАНИЗАЦИЯ ПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ БЕЛОГО ВЕЩЕСТВА ГОЛОВНОГО МОЗГА У ПАЦИЕНТОВ СО СПАСТИЧЕСКОЙ ДИПЛЕГИЕЙ ПОСЛЕ ТРАНСЛИНГВАЛЬНОЙ НЕЙРОСТИМУЛЯЦИИ

Анпилогова К. С.<sup>1</sup>, Чегина Д. С.<sup>1</sup>, Игнатова Т. С.<sup>2</sup>,  
Ефимцев А. Ю.<sup>1</sup>, Труфанов Г. Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр имени В. А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургское государственное бюджетное учреждение здравоохранения «Городская больница № 40 Курортного района», Санкт-Петербург, Россия

### Контактная информация:

Анпилогова Кристина Сергеевна,  
ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова»  
Минздрава России,  
ул. Аккуратова, д. 2, Санкт-Петербург,  
Россия, 197341.  
E-mail: kristina-anp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2021  
и принята к печати 10.10.2021.

### Резюме

**Актуальность.** Спастическая диплегия (болезнь Литтля) — самая распространенная форма детского церебрального паралича (ДЦП), приводящая к стойким двигательным и функциональным нарушениям. Одним из перспективных направлений реабилитации является комбинация физиотерапии с методами стимуляции различных отделов нервной системы, среди которых выделяют функциональную электростимуляцию мышц и нервов. **Цель исследования.** Изучение структурных изменений проводящих путей белого вещества головного мозга у пациентов со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции путем применения методики магнитно-резонансной трактографии. **Материалы и методы.** Проведено открытое одноцентровое контролируемое исследование. Всего обследовано 18 детей. Всем пациентам была выполнена комплексная МРТ в двух временных точках, до и после курса транслингвальной нейростимуляции, на томографе с индукцией магнитного поля 3,0 Тл, включавшая традиционный протокол в 3-х взаимно перпендикулярных плоскостях, а также диффузионно-взвешенных изображений — DWI (Diffusion-Weight Imaging). **Результаты.** У всех пациентов после нейростимуляции клинически отмечено улучшение координации движений и снижение мышечного тонуса с формированием новых моторных навыков, улучшение двигательной функции конечностей. Выявлено статистически значимое снижение индекса спастичности до 17 % для рук и 23 % для ног, улучшение качества моторных навыков по всем трем шкалам. **Заключение.** Транслингвальная нейростимуляция позволяет воздействовать на все компоненты моторной активности, в результате чего активируются процессы нейропластичности и головной мозг у пациентов со спастической диплегией становится более восприимчив к двигательной реабилитации, направленной на восстановление двигательного контроля и формирование новых моторных навыков.

**Ключевые слова:** детский церебральный паралич, количественная анизотропия, магнитно-резонансная томография, МР-трактография, нейрореабилитация, транслингвальная нейростимуляция.

Для цитирования: Анпилогова К.С., Чегина Д.С., Игнатова Т.С. и др. Структурная реорганизация проводящих путей белого вещества головного мозга у пациентов со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции. Трансляционная медицина. 2021;8(4):26-33. DOI: 10.18705/2311-4495-2021-8-4-26-33

# STRUCTURAL REORGANIZATION OF THE WHITE MATTER PATHWAYS OF THE BRAIN IN PATIENTS WITH SPASTIC DIPLEGIA AFTER TRANSLINGUAL NEUROSTIMULATION

Anpilogova K. S.<sup>1</sup>, Chegina D. S.<sup>1</sup>, Ignatova T. S.<sup>2</sup>, Efimtsev A. Yu.<sup>1</sup>, Trufanov G. E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia

<sup>2</sup>City Hospital № 40, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author:

Anpilogova Kristina S.,  
Almazov National Medical Research Centre,  
Akkuratova str. 2, Saint Petersburg, Russia,  
197341.

E-mail: kristina-anp@mail.ru

Received 05 September 2021; accepted  
10 October 2021.

## Abstract

**Background.** Spastic diplegia (Little's disease) is the most common form of infantile cerebral palsy (ICP), leading to persistent motor and functional impairments. One promising area of rehabilitation is a combination of physical therapy with methods of stimulation of various parts of the nervous system, among which functional electrical stimulation of muscles and nerves is the most prominent. **Objective.** To study structural changes of cerebral white matter conduction pathways in patients with spastic diplegia after translingual neurostimulation using magnetic resonance tractography. **Materials and Methods.** An open single center-controlled study was conducted. A total of 18 children were examined. All patients underwent comprehensive MRI in two time points, before and after a course of translingual neurostimulation, on a tomograph with magnetic field induction 3.0 Tesla, which included a traditional protocol in 3 mutually perpendicular planes), and diffusion-weighted imaging — DWI (Diffusion-Weight Imaging). **Results.** All patients after neurostimulation showed clinical improvement of movement coordination and decrease of muscle tone with formation of new motor skills, improvement of limb motor function. Statistically significant decrease of spasticity index was revealed up to 17% for arms and 23% for legs, improvement of motor skills on all three scales. **Conclusion.** Translingual neurostimulation allows to affect all components of motor activity, as a result of which neuroplasticity processes are activated and the brain of patients with spastic diplegia becomes more receptive to motor rehabilitation aimed at restoration of motor control and formation of new motor skills.

**Key words:** cerebral palsy, quantitative anisotropy, magnetic resonance imaging, MR tractography, neurorehabilitation, translingual neurostimulation.

*For citation: Anpilogova KS, Chegina DS, Ignatova TS, et al. Structural reorganization of the white matter pathways of the brain in patients with spastic diplegia after translingual neurostimulation. Translational Medicine. 2021;8(4):26-33. (In Russ.). DOI: 10.18705/2311-4495-2021-8-4-26-33*

**Список сокращений:** ДЦП — детский церебральный паралич, КА — количественная анизотропия, ТЛНС — транслингвальная нейростимуляция.

## Введение

Детский церебральный паралич (ДЦП) — группа стабильных нарушений развития моторики и поддержания позы, ведущих к тяжелым двигательным и функциональным изменениям. Данное заболевание, по данным различных авторов, развивается в 1,5-3,9 случаев на 1000 живых

новорожденных и является основной причиной детской инвалидности в Российской Федерации [1, 2]. Риск развития церебрального паралича увеличивается пропорционально уменьшению гестационного возраста и массы тела ребенка при рождении, наибольшему риску подвергаются младенцы, родившиеся на сроке менее 28 недель и с массой тела менее 1500 г [3-5].

Среди различных форм ДЦП до 80 % составляют спастические формы [6]. Спастичность мышц у пациентов с ДЦП приводит к ограничению объе-

ма активных и пассивных движений, что вызывает нарушения моторного развития ребенка, затрудняя формирование новых двигательных навыков [7].

Двигательная реабилитация детей со спастической диплегией является многокомпонентной и включает комплекс как медицинских, так и социально-педагогических мероприятий, целью которых является не только уменьшение спастичности мышц и увеличения амплитуды движения, но и восстановление двигательных функций и обучение ребенка новым моторным навыкам, которые ему необходимо использовать в повседневной жизни. Несмотря на достигнутые успехи, дети с ДЦП нуждаются в применении новых методик реабилитации, одной из которых является электростимуляция мышц и нервов [8, 9].

Доказано, что в основе восстановления и компенсации функций при ДЦП, как и при многих других заболеваниях нервной системы, лежит феномен нейропластичности, под которым понимают способность нервной системы изменять свое структурно-функциональное состояние под влиянием различных эндогенных и экзогенных факторов [10].

Метод транслингвальной нейростимуляции (ТЛНС) был разработан в США в конце 70-х годов XX века. В его основе лежит активация структур ствола мозга и мозжечка посредством электростимуляции передней поверхности языка, насыщенной разными видами рецепторов, с дополнением свободных нервных окончаний [11]. Передача нервных импульсов от передней поверхности языка непосредственно в структуры ствола мозга обеспечивается за счет тройничного и лицевого нервов. Происходит первичная активация ядер тройничного нерва и одновременная стимуляция соседнего ядра одиночного пути через лицевой нерв, непосредственное воздействие также оказывается на кохлеарные ядра, структуры коры и спинного мозга шейного отдела (С1-С3). Под вторичную активацию попадают ретикулярная формация, комплекс вестибулярных ядер и вентральная часть мозжечка, в которой проходят основные проводящие пути, отвечающие за контроль двигательных функций и положение тела в пространстве [12].

До настоящего времени основным методом оценки эффективности нейрореабилитации было сравнение показателей неврологических шкал до и после лечения. Для планирования лечения и прогнозирования его исхода важно понимать, какие изменения происходят в головном мозге на структурном и функциональном уровнях и на какие отделы нервной системы должно быть направлено лечебное воздействие, чтобы добиться лучших результатов.

Одним из современных методов нейровизуализации является магнитно-резонансная трактография (МР-трактография), применение которой позволяет определить минимальные изменения проводящих путей головного мозга. Еще в 1994 году Бассер и др. провели подробное исследование структуры и целостности нейронов в головном мозге с использованием диффузионной тензорной визуализации (DTI) [13], однако со временем было установлено, что данная модель имеет погрешности в областях мозга, содержащих пересекающиеся волокна, два или более пучка с разной ориентацией в одном вокселе [14, 15]. По оценкам, почти 90 % вокселей белого вещества содержат скрещивание волокон [16]. Для преодоления ограничений диффузионно-тензорной модели и более точного представления микроструктуры белого вещества были разработаны новые и более математически сложные модели [17–19], одной из которых является обобщенная визуализация q-выборки (generalized Q-sampling imaging, GQI), в основе которой лежит модель вычисления МР-сигналов, полученных с помощью диффузионной визуализации с высоким угловым разрешением (High Angular Resolution Diffusion Imaging, HARDI). Более высокое угловое разрешение обеспечивает более точное представление распределения диффузии воды в вокселе (50 направлений градиента вместо 6) [20].

Исследования показали большую чувствительность и специфичность трактографии на основе GQI для обнаружения различий в характеристиках диффузии белого вещества по сравнению с DTI [21–23].

Основным показателем диффузионно-тензорной визуализации является фракционная анизотропия (fractional anisotropy, FA, ФА), а показателем обобщенной визуализации q-выборки — количественная анизотропия (quantitative anisotropy, QA, КА) [24].

Определение морфологических изменений проводящих путей позволяет оценить степень двигательных нарушений и определить реабилитационный потенциал с разработкой прогностических критериев ДЦП [25]. Исследование механизмов нейропластичности при ДЦП на фоне проводимого лечения также актуальны в плане разработки новых и усовершенствования существующих методик нейрореабилитации.

**Цель исследования** — изучение структурных изменений проводящих путей белого вещества головного мозга у пациентов со спастической диплегией после транслингвальной нейростимуляции путем применения методики МР-трактографии.

**Материалы и методы исследования**

Проведено открытое одноцентровое контролируемое исследование по изучению структурных изменений проводящих путей белого вещества головного мозга у пациентов с ДЦП с формой спастической диплегии в поздней резидуальной стадии с сохранным интеллектом, без патологических изменений при электроэнцефалографии и аномалий развития головного мозга в анамнезе. Всего обследовано 18 детей. Средний возраст составил  $8 \pm 5$  лет (от 3 до 15 лет).

У всех пациентов был проведен осмотр неврологом, сбор анамнеза и жалоб, оценка состояния двигательных функций до и после нейростимуляции по неврологическим шкалам:

– шкала Ашворта, характеризующая спастичность мышц. Уровень спастичности выражается в баллах от 1 (легкая) до 5 (очень сильная); спастичность верхних (ASHH) и нижних (ASHL) конечностей оценивалась отдельно;

– шкала FMS (функциональная моторная шкала) для оценки освоения моторных навыков. Уровень выражается в баллах от 6 (легкая недостаточность) до 1 (очень сильный дефицит); оценку проводили в трех разных вариантах: при свободном поведении и передвижении на небольших расстояниях до 5 м (FMS 5); на расстоянии до 50 м (FMS 50) и на расстоянии до 500 м (FMS 500).

Также пациентам перед нейростимуляцией была выполнена электроэнцефалография для исключения эпилептической активности.

Все пациенты получали стандартное восстановительное лечение (массаж, занятия на тренажерах, водолечение, роботизированную механотерапию и специальную лечебную гимнастику — 10 еже-

дневных занятий длительностью 20 минут) в сочетании с транслингвальной нейростимуляцией.

Всем пациентам была выполнена комплексная МРТ в двух временных точках (до и после курса транслингвальной нейростимуляции) на томографе с индукцией магнитного поля 3,0 Тл, включавшая традиционный протокол в 3-х взаимно перпендикулярных плоскостях (с использованием стандартных импульсных последовательностей T1-, T2-, TIRM, MPRAGE), а также диффузионно-взвешенных изображений — DWI (Diffusion-Weight Imaging).

Параметры импульсной последовательности МР-трактографии (ep2d\_diff\_MDDW\_20\_p2): TR/TE — 4000/92 мс; направления — 48; матрица —  $256 \times 256$ ; толщина среза/зазор — 4,5/1; максимальный коэффициент диффузии (b-value) — 1000  $\text{с/мм}^2$  для всех 16 направлений градиента. Время сканирования — 3 минуты 42 секунды.

Из анализа МР-данных были исключены изображения с двигательными артефактами, а также выраженными морфологическими изменениями головного мозга, такими как гидроцефалия и обширные постишемические изменения.

Статистическую обработку и оценку результатов выявления структурных изменений проводящих путей головного мозга выполняли с помощью программного обеспечения для трактографии — DSI Studio.

Диффузионная МР-коннектометрия была использована для получения корреляционной трактографии, при которой КА коррелирует с изменениями после транслингвальной нейростимуляции. Для получения корреляции использовался непараметрический критерий Спирмена (FDR = 0,05).

**Таблица 1. Численные значения результатов использования шкалы Ашворта до и после ТЛНС ( $p < 0,01$ )**

Индекс спастичности рук, ASHH			Индекс спастичности ног, ASHL		
До	После	%	До	После	%
$2,7 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$	-17	$3,1 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$	-23

**Таблица 2. Численные значения результатов шкал FMS 5, FMS 50 и FMS 500 до и после ТЛНС ( $p < 0,01$ )**

FMS 5			FMS 50			FMS 500		
До	После	%	До	После	%	До	После	%
$2,1 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$	59	$1,9 \pm 0,1$	$2,8 \pm 0,1$	51	$1,7 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$	31

Постпроцессинговая обработка данных МР-трактографии с реконструкцией проводящих путей позволила визуализировать структурные изменения головного мозга после транслингвальной нейростимуляции.

### Результаты исследования и их обсуждение

У всех пациентов после нейростимуляции клинически отмечено улучшение координации движений и снижение мышечного тонуса с формированием новых моторных навыков, улучшение двигательной функции конечностей. Выявлено статистически значимое снижение индекса спастичности до 17 % для рук и 23 % для ног (табл. 1), улучшение качества моторных навыков по всем трем шкалам: FMS 5 до 59 %, FMS 50 до 51 %, FMS 500 до 31 % (табл. 2).

По данным традиционной МРТ у всех обследованных пациентов были выявлены перивентрикулярные кистозно-глиозные изменения постгипоксического генеза, у 16 пациентов обнаружены признаки истончения мозолистого тела (преимущественно в области валика), у 9 пациентов было отмечено умеренное расширение желудочковой системы головного мозга (преимущественно за счет задних рогов боковых желудочков). Различий между структурными изменениями головного мозга на нативных МР-изображениях до и после транслингвальной нейростимуляции не выявлено.

При анализе данных МР-трактографии было выявлено статистически значимое повышение КА в колоне и валике мозолистого тела, нижнем лобно-затылочном пучке слева, средних ножках мозжечка (рис. 1, 2).

Согласно современным данным, изначальное снижение КА мозолистого тела у детей со спастической диплегией обусловлено его истончением и коррелирует с тяжестью двигательных нарушений, а также является точным индикатором моторного дефицита, особенно в отношении улучшения мануальных навыков [26–28]. Увеличение КА мозолистого тела после транслингвальной нейростимуляции свидетельствует о повышении эффективности существующих нейронных сетей и усиления синаптогенеза, что клинически проявляется в формировании новых моторных навыков, доведения их до автоматизма, а это, в свою очередь, значительно повышает качество жизни и расширяет двигательные возможности пациента.

Нижний лобно-затылочный пучок — вентральный ассоциативный путь, соединяющий лобную долю с затылочной и теменной через височную долю и островок, и может играть определенную

роль в смешанной сенсорно-моторной интеграции за счет среднего компонента [29], и соответственно повышение КА в пучке свидетельствует об улучшении проведения нервных импульсов по проводящему пути и коррелирует с улучшением двигательных функций.

Средние ножки мозжечка соединяются с мостом и содержат поперечные волокна к нейронам коры полушарий. Через средние ножки проходит корково-мосто-мозжечковый путь (часть пирамидного пути), благодаря которому кора большого мозга обеспечивает контроль над деятельностью мозжечка, который является центром равновесия и координации движений [30]. Можно предположить, что повышение КА в средних ножках мозжечка после транслингвальной нейростимуляции усиливает корковую регуляцию и коррекцию движений в процессе их выполнения, программирование движений и двигательное научение, т. е. формирование моторных навыков и перевод произвольных движений в автоматизированные.

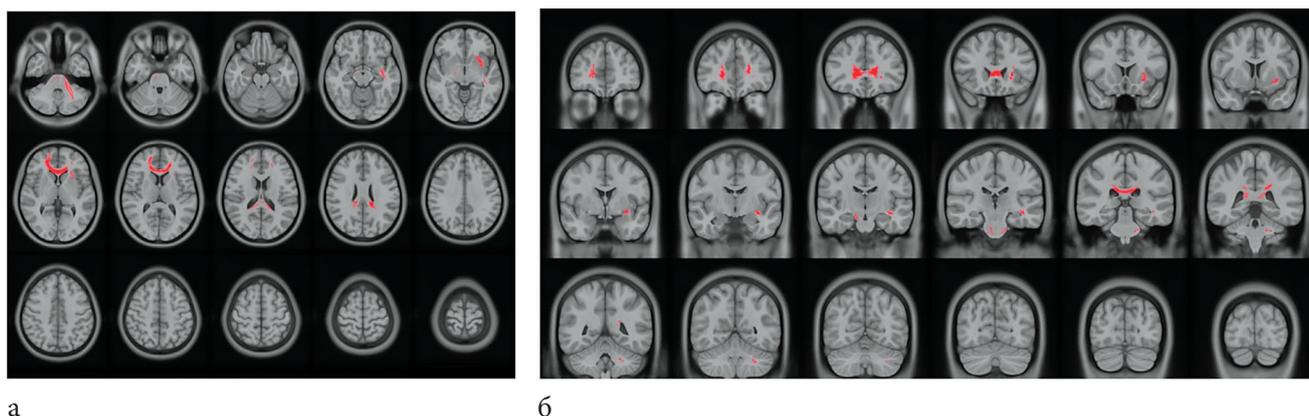
### Заключение

Транслингвальная нейростимуляция позволяет воздействовать на все компоненты моторной активности, в результате чего активируются процессы нейропластичности и головной мозг у пациентов со спастической диплегией становится более восприимчив к двигательной реабилитации, направленной на восстановление двигательного контроля и формирование новых моторных навыков.

Проведение МР-трактографии позволяет оценить микроструктурные изменения белого вещества и структурно-функциональное состояние моторных и сенсорных проводящих путей до и после транслингвальной нейростимуляции, что представляется важным для определения прогностического значения данного метода и имеет существенное клинико-диагностическое значение. Увеличение КА в проводящих путях после нейростимуляции, ответственных за двигательную функцию, коррелирует с клиническими данными в виде уменьшения спастичности и формирования моторных навыков у детей со спастической диплегией и доказывает, что мозг ребенка пластичен и способен к удивительной реорганизации, механизмы которой мы только начинаем изучать.

### Конфликт интересов / Conflict of interest

Авторы заявили об отсутствии потенциально конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest

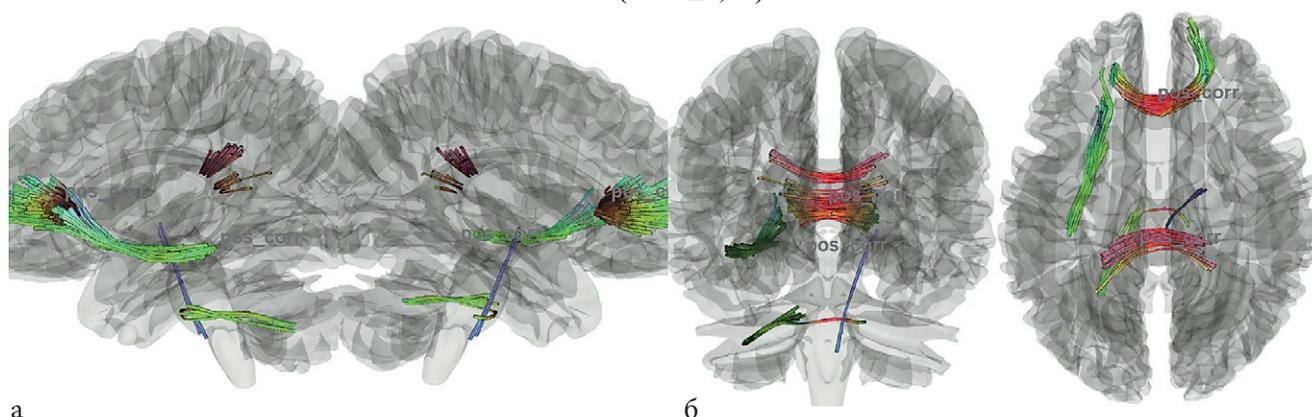


а

б

**Рис. 1. Графическое представление результатов межгруппового статистического анализа: карты со схематическим представлением, совмещенные с анатомическим атласом головного мозга в аксиальной (а) и корональной (б) плоскостях. Показаны изменения, возникающие после транслингвальной нейростимуляции. Красным отмечены проводящие пути с повышением КА ( $FDR \leq 0,05$ )**

**Fig. 1. Graphical representation of the results of inter-group statistical analysis: maps with a schematic representation, combined with an anatomical atlas of the brain. The changes that occur after translingual neurostimulation are shown. Tracks with an increase in the QA coefficient are marked in red ( $FDR \leq 0,05$ )**



а

б

**Рис. 2. Графическое представление результатов межгруппового статистического анализа: 2D-реконструкция в сагиттальной плоскости (а) и корональной плоскости (б).**

**Показаны проводящие пути с повышением КА после транслингвальной нейростимуляции**  
**Fig. 2. Graphical representation of the results of inter-group statistical analysis: 2D reconstruction in the sagittal plane (a) and coronal plane (b). Tracks of increasing the QA coefficient after translingual neurostimulation are shown**

#### Список литературы / References

1. Federal clinical guidelines for providing medical care to children with cerebral palsy. Union of Pediatricians of Russia. 2013. 28 p. In Russian [Федеральные клинические рекомендации по оказанию медицинской помощи детям с детским церебральным параличом. Союз педиатров России. 2013. 28 с.]

2. Kodaneva LN, Adijatullina NV. The possibility of hydro kinesotherapy in the rehabilitation of children with the disease Little. Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta. 2018;1(155):122-126. In Russian [Коданева Л.Н., Адиятуллина Н.В. Возможности гидрокинезотерапии в реабилитации детей с болезнью Литтля. Ученые записки университета имени П.Ф. Лесгафта. 2018;1(155):122-126.]

ски университета имени П.Ф. Лесгафта. 2018;1(155):122-126.]

3. Oskoui M, Coutinho F, Dykeman J, et al. An update on the prevalence of cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis. Dev Med Child Neurol. 2013;55(6):509-519. DOI: 10.1111/dmcn.12080.

4. Baranov AA, Namazova-Baranova LS, Kurenkov AL, et al. Kompleksnaya otsenka dvigatel'nykh funktsii u patsientov s detским tserebral'nym paralichom. M: Pediatr, 2014. 84 p. In Russian [Баранов А.А., Намазова-Баранова Л.С., Куренков А.Л. и др. Комплексная оценка двигательных функций у пациентов с детским церебральным параличом. М: ПедиатрЪ, 2014. 84 с.]

5. Dean E. Cerebral palsy. *Nurs Child Young People*. 2017;29(3):11. DOI: 10.7748/ncyp.29.3.11.s11.
6. Badalyan LO. *Detskaya nevrologiya*. М.: MEDpress-inform, 2016. 608 p. In Russian [Бадалян Л.О. Детская неврология. М.: МЕДпресс-информ, 2016. 608 с.].
7. Troska ZA, Shershneva OA. Improvement of professional rehabilitation of children with cerebral palsy. *Scientific notes of RSSU*. 2015 14(3/130):156-167. In Russian [Троска З.А., Шершнева О.А. Совершенствование профессиональной реабилитации детей, больных ДЦП. Ученые записки Российского государственного социального университета. 2015;14(3/130):156–167].
8. Zvozil AV, Morenko ES, Vissarionov SV et al. Functional and spinal stimulation in complex aftertreatment with cerebral spastic infantile paralysis. *Advances in current natural sciences*. 2015;2:40-46. In Russian [Звозил А.В., Моренко Е.С., Виссарионов С.В. и др. Функциональная и спинальная стимуляция в комплексной реабилитации пациентов с ДЦП. Успехи современного естествознания. 2015;2:40–46].
9. Danilov YP, Tyler ME, Skinner KL, et al. Efficacy of electrocutaneous vestibular substitution in patients with peripheral and central vestibular loss. *J Vestib Res*. 2007;17(2–3):119–113.
10. Danilov YP, Tyler ME, Kaczmarek KA. Vestibular sensory substitution using tongue electrocutaneous display. In Grunwald M. *Human Haptic Perception: Basics and Applications*. Birkhauser Basel Switzerland. 2008; 467-480.
11. Ignatova TS, Scoromets AR, Kolbin VE, et al. Translingual brain neurostimulation in treatment of the pediatric cerebral palsy. *Bulletin of Rehabilitation Medicine*. 2016;(6):10–16. In Russian [Игнатова Т.С., Скоромец А.П., Колбин В.Е. и др. Транслингвальная нейростимуляция головного мозга в лечении детей с церебральным параличом. Вестник восстановительной медицины. 2016;6(76):10–16].
12. Ignatova TS, Ikoeva GA, Kolbin VE, et al. Effectiveness evaluation of translingual neurostimulation in motor rehabilitation in children with spastic diplegia. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 2019;7(2):17-24. In Russian [Игнатова Т.С., Икоева Г.А., Колбин В.Е. и др. Оценка эффективности транслингвальной нейростимуляции в двигательной реабилитации у детей со спастической диплегией. Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2019;7(2):17–24. DOI: 10.17816/PTORS7217-24].
13. Basser PJ, Pajevic S, Pierpaoli C, et al. In vivo fiber tractography using DT-MRI data. *Magn Reson Med*. 2000;44(4):625–632. DOI: 10.1002/1522-2594(200010)44:4<625::aid-mrml17>3.0.co;2-o.
14. Schilling K, Gao Y, Janve V, et al. Can increased spatial resolution solve the crossing fiber problem for diffusion MRI? *NMR Biomed*. 2017;30(12):1–29. DOI: 10.1002/nbm.3787
15. Tournier J-D, Calamante F, Gadian DG, et al. Direct estimation of the fiber orientation density function from diffusion-weighted MRI data using spherical deconvolution. *Neuroimage*. 2004;23(3):1176–1185. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.07.037.
16. Chandwani R, Kline JE, Harpster K, et al. Early micro- and macrostructure of sensorimotor tracts and development of cerebral palsy in high risk infants. *Hum Brain Mapp*. 2021;42(14):4708-4721. DOI: 10.1002/hbm.25579.
17. Jeurissen B, Tournier JD, Dhollander T, et al. Multi-tissue constrained spherical deconvolution for improved analysis of multi-shell diffusion MRI data. *Neuroimage*. 2014;103:411–426. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2014.07.061.
18. Wang Y, Wang Q, Haldar JP, et al. Quantification of increased cellularity during inflammatory demyelination. *Brain*. 2011;134(Pt 12):3590-601. DOI: 10.1093/brain/awr307.
19. Zhang H, Schneider T, Wheeler-Kingshott CA, et al. NODDI: Practical in vivo neurite orientation dispersion and density imaging of the human brain. *Neuroimage*. 2012;61(4):1000–1016. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.03.072.
20. Hess CP, Mukherjee P, Han ET, et al. Q-ball reconstruction of multimodal fiber orientations using the spherical harmonic basis. *Magn Reson Med*. 2006;56(1):104–117. DOI: 10.1002/mrm.20931.
21. Auriat AM, Borich MR, Snow NJ, et al. Comparing a diffusion tensor and non-tensor approach to white matter fiber tractography in chronic stroke. *Neuroimage Clin*. 2015;7:771–781. DOI: 10.1016/j.nicl.2015.03.007.
22. Jeurissen B, Leemans A, Tournier J, et al. Investigating the prevalence of complex fiber configurations in white matter tissue with diffusion magnetic resonance imaging. *Hum Brain Mapp*. 2013;34(11):2747–2766. DOI: 10.1002/hbm.22099.
23. Jin Z, Bao Y, Wang Y, et al. Differences between generalized Q-sampling imaging and diffusion tensor imaging in visualization of crossing neural fibers in the brain. *Surg Radiol Anat*. 2019;41(9):1019–1028. DOI: 10.1007/s00276-019-02264-1.
24. Yeh F-C, Vettel JM, Singh A, et al. Quantifying differences and similarities in whole-brain white matter architecture using local connectome fingerprints. *PLOS Comput Biol*. 2016;12(11):e1005203. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1005203.
25. Mamedyarov AM, Namazova-Baranova LS, Ermolina YV, et al. Assessment of motor and sensory pathways of the brain using diffusion-tensor tractography in children with cerebral palsy. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*. 2014;9–10:70–76. In Russian [Мамедьяров А.М., Намазова-Баранова Л.С., Ермолина Ю.В. и др. Возможности оценки моторных и сенсорных проводящих путей головного мозга с помощью диффузионно-тензорной трактографии у детей с детским церебральным параличом. Вестник Российской академии медицинских наук. 2014;9–10:70–76].
26. Zykin PA, Yalfimov AN, Aleksandrov TA, et al. Developmental features of corpus callosum in children revealed by MRI. *Pediatrician (St. Petersburg)*. 2018;9(1):37-48. DOI: 10.17816/PED9137-48. In Russian [Зыкин П.А., Ялфимов А.Н., Александров Т.А. и др. Особенности развития мозолистого тела мозга детей по данным МРТ. Педиатр. 2018;9(1):37–48. DOI: 10.17816/PED9137-48].
27. Mourao LF, Friel KM, Sheppard JJ, et al. The role of the corpus callosum in pediatric dysphagia: preliminary findings from a diffusion tensor imaging study in children with unilateral spastic cerebral palsy. *Dysphagia*. 2017;32(5):703–713. DOI: 10.1007/s00455-017-9816-0.
28. Weinstein M, Green D, Geva R, et al. Interhemispheric and intrahemispheric connectivity and

manual skills in children with unilateral cerebral palsy. *Brain Struct Funct.* 2014;219(3):1025-1040. DOI: 10.1007/s00429-013-0551-5.

29. Potapov AA, Goryainov SA, Zhukov VYu, et al. The long association pathways of the white matter: the modern neuroscience view. *Zhurnal Voprosy Neurokhirurgii Imeni N.N. Burdenko.* 2014;78(5):66-77. In Russian [Потапов А.А., Горяйнов С.А., Жуков В.Ю. и др. Длинные ассоциативные пути белого вещества головного мозга: современный взгляд с позиции нейронаук. Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко. 2014;78(5):66-77.]

30. Vagapova VSh, Borzilova OKh, Rybalko DYu, et al. *Funktsional'naya anatomiya tsentral'noi nervnoi sistemy: uchebnoe posobie. 2-e izd; ispr. i dop.* Ufa: Izd-vo FGBOU VO BGMU Minzdrava Rossii, 2018. 111 p. In Russian [Вагапова В.Ш., Борзилова О.Х., Рыбалко Д.Ю. и др. Функциональная анатомия центральной нервной системы: учебное пособие. 2-е изд; испр. и доп. Уфа: Изд-во ФГБОУ ВО БГМУ Минздрава России, 2018. 111 с.]

#### **Информация об авторах:**

Анпилогова Кристина Сергеевна, клинический ординатор кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Чегина Дарья Сергеевна, аспирант кафедры лучевой диагностики и медицинской визуализации ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Игнатова Татьяна Сергеевна, врач-невролог, СПб ГБУЗ «Городская больница № 40»;

Ефимцев Александр Юрьевич, к.м.н., ведущий научный сотрудник НИЛ лучевой визуализации, ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России;

Труфанов Геннадий Евгеньевич, д.м.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела лучевой диагностики, заведующий кафедрой лучевой диагностики и медицинской визуализации ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова» Минздрава России.

#### **Author information:**

Anpilogova Kristina S., Resident of Radiology Department, Almazov National Medical Research Centre;

Chegina Daria S., Postgraduate Student, Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging, Almazov National Medical Research Centre;

Ignatova Tatiana S., Neurologist, City Hospital № 40;

Efimtsev Aleksandr Yu., PhD, Leading Researcher, Research Laboratory of Radiation Imaging, Almazov National Medical Research Centre;

Trufanov Gennadiy E., Dr. Sc., Professor, Chief Researcher of the Research Department of Radiation Diagnostics, Head of the Department of Radiation Diagnostics and Medical Imaging, Almazov National Medical Research Centre.