



УДК 616-053.32+612.648.1+616.833-009-053.35/.36+543.429.2

## ПРИМЕНЕНИЕ ДИФУЗИОННО-ТЕНЗОРНОЙ МРТ В ДИАГНОСТИКЕ ПЕРИНАТАЛЬНОГО ГИПОКСИЧЕСКИ-ИШЕМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ГОЛОВНОГО МОЗГА У НЕДОНОШЕННЫХ НОВОРОЖДЕННЫХ

© Виктор Сергеевич Львов, Дмитрий Олегович Иванов, Александр Владимирович Поздняков, Татьяна Владимировна Мелашенко, Леонид Михайлович Макаров, Ольга Федоровна Позднякова

Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет. 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2

**Контактная информация:** Виктор Сергеевич Львов — эпилептолог, врач функциональной диагностики, невролог.  
E-mail: viktorlvov@list.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2711-5321> SPIN: 5372-1970

*Для цитирования:* Львов В.С., Иванов Д.О., Поздняков А.В., Мелашенко Т.В., Макаров Л.М., Позднякова О.Ф. Применение диффузионно-тензорной МРТ в диагностике перинатального гипоксически-ишемического поражения головного мозга у недоношенных новорожденных // Визуализация в медицине. 2024. Т. 6. № 1. С. 3–10.

Поступила: 10.01.2024

Одобрена: 13.02.2024

Принята к печати: 20.03.2024

**Резюме. Введение.** В процессе внутриутробного развития чувствительные пути миелинизируются раньше двигательных, что обуславливает более высокую чувствительность к гипоксии данных регионов мозга. **Цель исследования.** Выявить статистически значимые различия в показателях диффузии по данным диффузионно-тензорной магнитно-резонансной томографии (ДТ-МРТ) у недоношенных детей с тяжелым гипоксически-ишемическим поражением центральной нервной системы (ЦНС) в виде перивентрикулярной лейкомаляции (ПВЛ) и пери-интравентрикулярных кровоизлияний (ПИВК). **Материалы и методы.** В исследование были включены 45 недоношенных детей, находившихся на выхаживании в условиях перинатального центра СПбГПМУ. Гестационный возраст пациентов при рождении составлял от 25 до 30 недель. **Результаты.** В исследовании не было выявлено изменение показателей диффузии в области двигательных путей у детей с ПВЛ и ПИВК по сравнению с детьми с нормальной МРТ. Однако у детей с отсутствием структурных изменений на МРТ отмечены более высокие значения ФА в задней части ЗНБК, что отражает более высокую упорядоченность проводящих путей на данном уровне. При этом в группах детей с ПВЛ и ПИВК данная закономерность не выявлялась. **Заключение.** Для тяжелого гипоксически-ишемического поражения ЦНС у недоношенных новорожденных в возрасте 28–32 недели гестации характерна дисмиелинизация в области задних частей задних ножек внутренних капсул, содержащих чувствительные пути, что влечет уменьшение показателя фракционной анизотропии, определяемого при проведении ДТ-МРТ. Показатель ФА в задней части задней ножки внутренней капсулы может служить перспективным количественным маркером тяжелого гипоксически-ишемического поражения ЦНС.

**Ключевые слова:** перинатальное гипоксически-ишемическое поражение центральной нервной системы, перивентрикулярная лейкомаляция, пери-интравентрикулярное кровоизлияние, магнитно-резонансная томография, диффузионно-тензорная МРТ.

## THE USE OF DIFFUSION TENSOR MRI IN THE DIAGNOSIS OF PERINATAL HYPOXIC-ISCHEMIC BRAIN DAMAGE IN PREMATURE NEWBORNS

© Viktor S. Lvov, Dmitry O. Ivanov, Alexander V. Pozdnyakov, Tatyana V. Melashenko, Leonid M. Makarov, Olga F. Pozdnyakova

Saint Petersburg State Pediatric Medical University. 2 Lithuania, Saint Petersburg 194100 Russian Federation

**Contact information:** Viktor S. Lvov — Epileptologist, Functional Diagnostics Doctor, Neurologist.  
E-mail: viktorlvov@list.ru ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2711-5321> SPIN: 5372-1970

*For citation:* Lvov VS, Ivanov DO, Pozdnyakov AV, Melashenko TV, Makarov LM, Pozdnyakova OF. The use of diffusion tensor MRI in the diagnosis of perinatal hypoxic-ischemic brain damage in premature newborns. Visualization in Medicine. 2024;6(1):3–10.

Received: 10.01.2024

Revised: 13.02.2024

Accepted: 20.03.2024

**Abstract. Introduction.** In the process of intrauterine development, the sensory pathways are myelinated earlier than the motor ones, which causes a higher sensitivity to hypoxia of these regions of the brain. **The purpose of the study.** To identify statistically significant differences in diffusion indices according to diffusion tensor MRI (DTI) data in premature infants with severe hypoxic-ischemic central nervous system damage in the form of periventricular leukomalacia (PVL) and peri-intraventricular hemorrhages (PIVH). **Materials and methods.** The study included 45 premature infants who were being cared for in the conditions of the perinatal center of St. Petersburg State Medical University. The gestational age of the patients at birth ranged from 25 to 30 weeks. **Results.** The study did not reveal a change in the diffusion indices in the area of the motor tract in children with PVL and PIVH compared with children with normal MRI. However, in children with no structural changes on MRI, higher FA values were noted in the posterior part of the PLIC (which reflects a higher organisation of the pathways at this level). At the same time, this pattern was not revealed in the groups of children with PVL and PIVH. **Conclusion.** Severe hypoxic-ischemic CNS damage in premature newborns aged 28-32 weeks of gestation is characterized by dysmyelination in the posterior parts of the hind legs of internal capsules containing sensitive pathways, which leads to a decrease in the index of fractional anisotropy determined by DTI. The FA index in the posterior part of PLIC can serve as a promising quantitative marker of severe hypoxic-ischemic brain injury.

**Keywords:** hypoxic-ischemic brain injury, periventricular leicomalacia, peri-intraventricular hemorrhage, magnetic resonance imaging, diffusion tensor imaging

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время магнитно-резонансная томография (МРТ) признается наиболее информативным и специфичным методом для диагностики перинатальных поражений центральной нервной системы (ЦНС) [1, 2]. Однако ранняя диагностика таких состояний у новорожденных продолжает оставаться сложной. Оценить степень тяжести и прогноз гипоксически-ишемического поражения ЦНС у новорожденных методами стандартного обследования не всегда представляется возможным.

С помощью метода МРТ возможно не только выявление структурных изменений ЦНС, но и оценка миелинизации церебральных структур у новорожденных. Предложен ряд методик оценки миелинизации [3–5], однако ни одна из них не является оптимальной и конечной.

Имеются сообщения, что при тяжелом гипоксически-ишемическом поражении ЦНС у недоношенных новорожденных дисмиелинизация определяется чаще в области задней ножки внутренней капсулы (ЗНК) [6].

Диффузионно-тензорная МРТ (ДТ-МРТ) является перспективной методикой, позволяющей количественно оценить степень миелинизации головного мозга, визуализировать проводящие пути, оценить их структуру и целостность. Ряд исследований указывает на высокую ценность количественных данных, полученных при проведении ДТ-МРТ в прогнозировании исхода гипоксически-ишемического поражения ЦНС [7–10].

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выявить статистически значимые различия в показателях диффузии по данным диффузионно-тензорной МРТ (ДТ-МРТ) у недоношенных детей

с тяжелым гипоксически-ишемическим поражением ЦНС в виде перивентрикулярной лейкомаляции (ПВЛ) и пери-интравентрикулярных кровоизлияний (ПИВК).

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследование были включены 45 недоношенных детей, находившихся на выхаживании в условиях перинатального центра СПбГПМУ. Гестационный возраст пациентов при рождении составлял от 25 до 30 недель. Из них у 12 детей (27%) была диагностирована церебральная ишемия легкой степени, у 4 пациентов (9%) — церебральная ишемия средней степени, 29 (64%) — церебральная ишемия тяжелой степени, у данных пациентов наблюдался длительный синдром угнетения центральной нервной системы, длительная потребность в аппаратной искусственной вентиляции легких.

Критериями включения являлись: недоношенность, гестационный срок на момент проведения магнитно-резонансной томографии (МРТ) 28–32 недели постконцептуального возраста (ПКВ); к критериям исключения относились: верифицированное генетическое, нейрометаболическое заболевание, пороки развития центральной нервной системы (ЦНС).

Всем детям была выполнена МРТ. Гестационный возраст пациентов на момент исследования составлял от 28 до 32 недель. ПКВ, средний паспортный возраст на момент исследования составил 1 месяц 1 неделя жизни.

МРТ проводилась на томографе Philips Ingenia с индукцией магнитного поля 1,5 Тл. Были получены T1-, T2-ВИ, FLAIR-ВИ. При анализе МРТ всем пациентам проводилась оценка степени церебральной зрелости [3] по данным T1- и T2-ВИ.

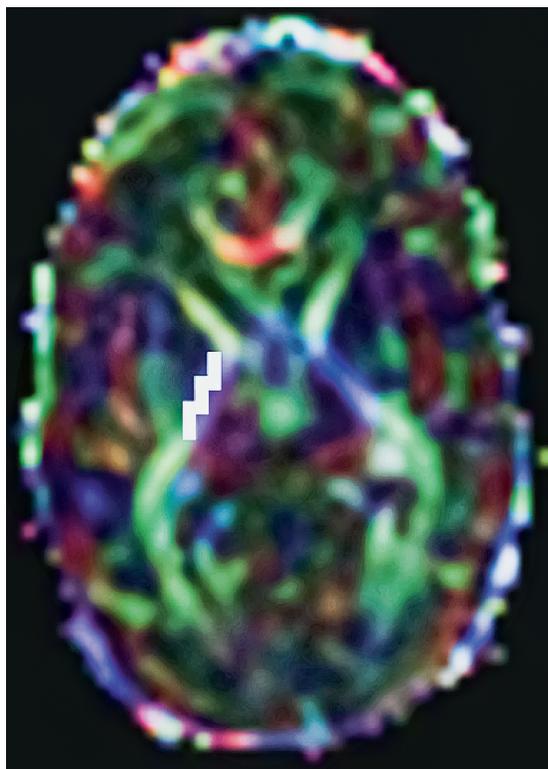


Рис. 1. На представленном изображении выделены зоны интереса — передняя и задняя часть ЗНВК. Пациент А. Гестационный возраст при рождении 26 недель, возраст к моменту проведения МРТ — 30 недель постконцептуального возраста

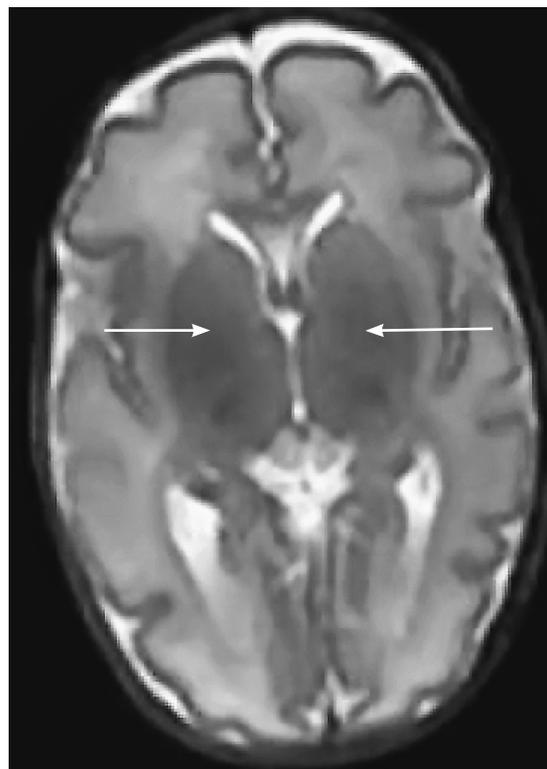


Рис. 2. Первичная миелинизация в таламусах (отмечены стрелками). T2-ВИ, аксиальный срез. Пациент А. Гестационный возраст при рождении 26 недель, возраст к моменту проведения МРТ — 30 недель постконцептуального возраста

Всем детям дополнительно проведена ДТ-МРТ. Постпроцессинговый анализ ДТ-МРТ выполнен с использованием программного обеспечения FiberTrack (Philips). Зоны интереса — передняя и задняя часть ЗНВК (рис. 1), таламусы.

Количественные показатели — фракционная анизотропия (ФА), коэффициент диффузии (apparent diffusion coefficient, ADC) были рассчитаны автоматически.

Статистическая обработка полученных данных проводилась на персональном компьютере с использованием программного обеспечения STATISTICA 10.0. Использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни ввиду того, что распределение показателей существенно отличалось от нормального. Различия считались достоверными при значении  $p \leq 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

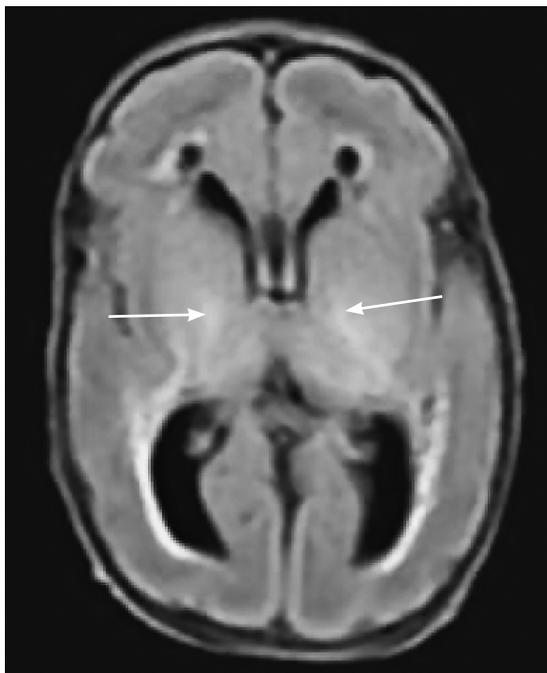
У 12 недоношенных новорожденных (27%) патологии на МРТ выявлено не было. Степень зрелости церебральных структур соответствовала постконцептуальному возрасту детей (рис. 2).

У 18 пациентов (40%) выявлена кистозная ПВЛ. У 10 пациентов с ПВЛ также выявлены пери-интравентрикулярные кровоизлияния: у 6 — двусторонние, у 4 — одностороннее. При этом была отмечена задержка развития церебральных структур (рис. 3). Все эти пациенты имели клиническую картину церебральной ишемии тяжелой степени.

У 15 пациентов (33%) выявлены пери-интравентрикулярные кровоизлияния (без перивентрикулярной лейкомаляции): у 5 пациентов — в правой гемисфере, у 7 пациентов — в левой гемисфере, у 3 пациентов — билатеральные. У пациентов данной группы также была отмечена задержка развития церебральных структур. 11 из этих детей имели клиническую картину церебральной ишемии тяжелой степени, 4 — церебральной ишемии средней тяжести.

В результате статистического сравнения количественных показателей диффузии были обнаружены следующие различия.

- 1) При сравнении показателей диффузии в задних ножках внутренних капсул между группой детей с отсутствием структурных изменений



**Рис. 3.** Задержка миелинизации в таламусах (отмечены стрелками). T2-ВИ, аксиальный срез. Пациент Б. Гестационный возраст при рождении — 27 недель, возраст к моменту проведения МРТ — 29 недель постконцептуального возраста

на МРТ и группой детей с ПВЛ было выявлено достоверное уменьшение ФА в области задней части задней ножки внутренней капсулы справа у детей с ПВЛ ( $p=0,02$ ).

В то же время значения ФА в области передней половины задней ножки правой внутренней капсулы статистически не различались. Значения ФА в области правой ЗНВК статистически не различались. Различий в показателях ADC между группами выявлено не было. Средние значения показателей диффузии в области ЗНВК приведены в таблице 1.

- 2) При сравнении показателей диффузии в задних ножках внутренних капсул у детей с отсутствием структурных изменений на МРТ и группой детей с ПИВК достоверных различий выявлено не было. Средние значения показателей диффузии в области ЗНВК приведены в таблице 2.
- 3) При сравнении показателей диффузии в таламусах в группе детей с отсутствием структурных изменений на МРТ и группой детей с ПВЛ достоверных различий выявлено не было. У детей с ПИВК по сравнению с группой детей с нормальной МРТ показатели диффузии в таламусах также не различались.

Средние значения приведены в таблицах 3 и 4 соответственно.

При сравнении показателей диффузии в передней и задней половинах задних ножек внутренних капсул у детей с отсутствием структурных изменений на МРТ выявлена закономерность, приведенная в таблице 5.

ФА в задней половине правой ЗНВК была достоверно выше, чем в передней половине ( $p=0,02$ ). В левой ЗНВК наблюдалась тенденция к подобным различиям ( $p=0,06$ ). Показатель ADC при этом достоверно не различался.

При этом как в группе детей с ПВЛ, так и в группе детей с ПИВК показатели диффузии в передней и задней половинах задних ножек внутренних капсул значимо не различались. Средние значения приведены в таблицах 6 и 7 соответственно.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно представлениям об анатомии проводящих путей головного мозга, передняя часть ЗНВК содержит преимущественно двигательные пути (кортикоспинальный и кортиконуклеарный пути), в то время как в задней ножке ЗНВК проходят преимущественно соматосенсорные пути. Известно, что в ЦНС в процессе внутриутробного развития чувствительные пути миелинизируются раньше двигательных [11, 12], что обуславливает более высокую чувствительность к гипоксии данных регионов мозга. Это подтверждают полученные данные, демонстрируя у детей с отсутствием структурных изменений на МРТ увеличение ФА в задней части ЗНВК (что отражает более высокую упорядоченность проводящих путей на данном уровне). При этом в группах детей с ПВЛ и ПИВК данная закономерность не выявляется, что может свидетельствовать о снижении темпов миелинизации проводящих путей вследствие гипоксического воздействия. В то же время в исследовании не было выявлено изменения показателей диффузии в области двигательных путей у детей с ПВЛ и ПИВК по сравнению с детьми с нормальной МРТ.

Мы не обнаружили различий показателей диффузии между группами в таламусах. В ряде обзорных работ, посвященных лучевой диагностике гипоксически-ишемического поражения ЦНС, имеются указания на низкую распространенность повреждения таламусов у недоношенных новорожденных [1]. В то же время имеются и противоположные мнения [13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать вывод, что для тяжелого гипоксически-ишемического поражения

Таблица 1

**Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии в области ЗНБК (ФА, ADC)  
у детей с нормальной МРТ и детей с ПВЛ**

Анатомическая структура	Пациенты с отсутствием структурных изменений на МРТ (n=12)	Дети с ПВЛ (n=18)	P-значение
ЗНБК, ФА	0,32	0,27	<b>0,02</b>
ЗНБК, прав. задн. часть, ADC	1,26	1,25	1,0
ЗНБК, лев. задн. часть, ФА	0,35	0,31	0,31
ЗНБК, лев. задн. часть, ADC	1,25	1,18	0,7
ЗНБК, прав. передн. часть, ФА	0,28	0,30	0,83
ЗНБК, прав. передн. часть, ADC	1,27	1,18	0,17
ЗНБК, лев. передн. часть, ФА	0,30	0,31	0,83
ЗНБК, лев. передн. часть, ADC	1,26	1,18	0,1

**Примечание:** ЗНБК — задняя ножка внутренней капсулы; ПВЛ — перивентрикулярная лейкомаляция; ФА — фракционная анизотропия; ADC — коэффициент диффузии (apparent diffusion coefficient) (здесь и далее в таблицах).

Таблица 2

**Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии в области ЗНБК (ФА, ADC)  
у детей с нормальной МРТ и детей с ПИВК**

Анатомическая структура	Пациенты с отсутствием структурных изменений на МРТ (n=12)	Дети с ПИВК (n=15)	P-значение
ЗНБК, прав. задн. часть, ФА	0,32	0,38	0,22
ЗНБК, прав. задн. часть, ADC	1,26	1,17	0,29
ЗНБК, лев. задн. часть, ФА	0,35	0,37	0,29
ЗНБК, лев. задн. часть, ADC	1,25	1,12	0,22
ЗНБК, прав. передн. часть, ФА	0,28	0,36	0,08
ЗНБК, прав. передн. часть, ADC	1,27	1,15	0,22
ЗНБК, лев. передн. часть, ФА	0,30	0,35	0,57
ЗНБК, лев. передн. часть, ADC	1,26	1,15	0,16

**Примечание:** ПИВК — пери-интравентрикулярные кровоизлияния (здесь и далее в таблицах).

Таблица 3

**Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии в таламусах (ФА, ADC)  
у детей с нормальной МРТ и детей с ПВЛ**

Анатомическая структура	Пациенты с отсутствием структурных изменений на МРТ (n=12)	Дети с ПВЛ (n=18)	P-значение
Правый таламус, ФА	0,13	0,14	0,51
Правый таламус, ADC	1,29	1,19	0,20
Левый таламус, ФА	0,13	0,13	0,97
Левый таламус, ADC	1,25	1,25	0,69

Таблица 4

Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии в таламусах (ФА, ADC) у детей с нормальной МРТ и детей с ПИВК

Анатомическая структура	Пациенты с отсутствием структурных изменений на МРТ (n=12)	Дети с ПИВК (n=15)	P-значение
Правый таламус, ФА	0,13	0,15	0,46
Правый таламус, ADC	1,29	1,20	0,11
Левый таламус, ФА	0,13	0,19	0,37
Левый таламус, ADC	1,25	1,21	0,47

Таблица 5

Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии (ФА, ADC) в ЗНБК у детей с отсутствием структурных изменений на МРТ (n=12)

Сторона, показатель	Передняя часть ЗНБК	Задняя часть ЗНБК	P-значение
Правая гемисфера, ФА	0,28	0,32	0,02
Правая гемисфера, ADC	1,27	1,26	0,68
Левая гемисфера, ФА	0,32	0,35	0,06
Левая гемисфера, ADC	1,29	1,28	0,25

Таблица 6

Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии (ФА, ADC) в ЗНБК у детей с ПВЛ (n=18)

Сторона, показатель	Передняя часть ЗНБК	Задняя часть ЗНБК	P-значение
Правая гемисфера, ФА	0,30	0,27	0,32
Правая гемисфера, ADC	1,19	1,25	0,80
Левая гемисфера, ФА	0,31	0,31	0,38
Левая гемисфера, ADC	1,18	1,18	0,88

Таблица 7

Средние значения (медиана) количественных показателей диффузии (ФА, ADC) в ЗНБК у детей с ПИВК (n=15)

Сторона, показатель	Передняя часть ЗНБК	Задняя часть ЗНБК	P-значение
Правая гемисфера, ФА	0,36	0,38	1,0
Правая гемисфера, ADC	1,15	1,17	0,49
Левая гемисфера, ФА	0,35	0,37	0,89
Левая гемисфера, ADC	1,15	1,12	0,49

ЦНС у недоношенных новорожденных в возрасте 28–32 недели гестации характерна дисмиелинизация в области задних частей задних ножек внутренних капсул, содержащих чувствительные пути, что влечет уменьшение показателя фракционной анизотропии, определяемого при проведении ДТ-МРТ. Показатель ФА в задней части задней ножки внутренней капсулы может служить перспективным количественным маркером тяжелого гипоксически-ишемического поражения ЦНС.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Информированное согласие на публикацию.** Авторы получили письменное согласие законных представителей пациентов на публикацию медицинских данных.

#### ADDITIONAL INFORMATION

**Author contribution.** Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

**Consent for publication.** Written consent was obtained from legal representatives of patients for publication of relevant medical information within the manuscript.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Varghese B., Xavier R., Manoj V.C. et al. Magnetic resonance imaging spectrum of perinatal hypoxic-ischemic brain injury. *Indian J Radiol Imaging*. 2016;26(3):316–327.
- Tkach J.A., Merhar S.L., Kline-Fath B.M., Pratt R.G., Loew W.M., Daniels B.R., Dumoulin C.L. MRI in the neonatal ICU: initial experience using a smallfootprint 1.5-T system. *Am J Roentgenol*. 2014;202(1):W95–W105.
- Мелашенко Т.В. Критерии церебральной зрелости у недоношенных новорожденных по результатам нейровизуализации. *Лучевая диагностика и терапия*. 2014; 3(5):31–36.
- Zacharia Z., Zimine S., Lovblad K.O., Warfield S., Thoeny H., Ozdoba C., Bossi E., Kreis R., Boesch C., Schroth G., Hüppi P.S. Early Assessment of Brain Maturation by MR Imaging Segmentation in Neonates and Premature Infants. *Am J Neuroradiology*. 2006;27:972–977.
- Childs A-M., Ramenghi L.A., Cornette L., Tanner S.F., Arthur R.J., Martinez D., Levene M.I. Cerebral Maturation in Premature Infants: Quantitative Assessment Using MR Imaging. *A. J. Neuroradiology*. 2001;22:1577–1582.
- Мелашенко Т.В., Тащилкина Ю.А., Тащилкин А.И. Сравнительный анализ темпов миелинизации головного мозга по данным МРТ у недоношенных новорожденных с гипоксическо-ишемической энцефалопатией. *Journal of Roentgenology and Radiology*. 2013;1:19–24.
- Murakami A., Morimoto M., Yamada K., Kizu O., Nishimura A., Nishimura T., Sugimoto T. Fiber-tracking techniques

can predict the degree of neurologic impairment for periventricular leukomalacia. *Pediatrics*. 2008;122:500–506.

- Rose J., Mirmiran M., Butler E.E., Lin C.Y., Barnes P.D., Kermoian R., Stevenson D.K. Neonatal microstructural development of the internal capsule on diffusion tensor imaging correlates with severity of gait and motor deficits. *Dev Med Child Neurol*. 2007;49:745–50.
- deBruine F.T.D., Van Wezel-Meijler G., Leijser L.M., Steggerda S.J., Van Den Berg-Huysmans A.A., Rijken M., Van Buchem M.A., Van Der Grond J. Tractography and 2-year Follow-Up in Preterm Infants. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2013;55:427–433.
- Ермолина Ю.В. Особенности структурных и функциональных изменений головного мозга у детей со спастическими формами церебрального паралича. Дисс. ... канд. мед. наук. М.; 2016.
- Kinney H.C., Armstrong D.L. Perinatal neuropathology. In Graham DI, Lantos PE, editors: *Greenfield's Neuropathology*. London; 2002.
- Kinney H.C., Brody B.A., Kloman A.S., Gilles F.H. Sequence of central nervous system myelination in human infancy. II. Patterns of myelination in autopsied infants. *J Neuropathol Exp Neurol*. 1988;47:217–234.
- Volpe J.J. Brain injury in premature infants: a complex amalgam of destructive and developmental disturbances. *Lancet Neurol*. 2009;8(1):110–124.

#### REFERENCES

- Varghese B., Xavier R., Manoj V.C. et al. Magnetic resonance imaging spectrum of perinatal hypoxic-ischemic brain injury. *Indian J Radiol Imaging*. 2016;26(3):316–327.
- Tkach J.A., Merhar S.L., Kline-Fath B.M., Pratt R.G., Loew W.M., Daniels B.R., Dumoulin C.L. MRI in the neonatal ICU: initial experience using a smallfootprint 1.5-T system. *Am J Roentgenol*. 2014;202(1):W95–W105.
- Melashenko T.V. Kriterii tsebral'noy zrelosti u nedonoshennykh novorozhdennykh po rezul'tatam neyrovizualizatsii. [Criteria for cerebral maturity in premature newborns based on neuroimaging results]. *Luhevaya diagnostika i terapiya*. 2014;3(5):31–36. (in Russian).
- Zacharia Z., Zimine S., Lovblad K.O., Warfield S., Thoeny H., Ozdoba C., Bossi E., Kreis R., Boesch C., Schroth G., Hüppi P.S. Early Assessment of Brain Maturation by MR Imaging Segmentation in Neonates and Premature Infants. *Am J Neuroradiology*. 2006;27:972–977.
- Childs A-M., Ramenghi L.A., Cornette L., Tanner S.F., Arthur R.J., Martinez D., Levene M.I. Cerebral Maturation in Premature Infants: Quantitative Assessment Using MR Imaging. *A. J. Neuroradiology*. 2001;22:1577–1582.
- Melashenko T.V., Tashchilkina Yu.A., Tashchilkin A.I. Sravnitel'nyy analiz tempov miyelinizatsii golovnogo mozga po dannym MRT u nedonoshennykh novorozhdennykh s gipoksicheskoy ishemiyeskoy entsefalopatiyey. [Compa-

- rative analysis of the rate of brain myelination according to MRI data in premature newborns with hypoxic-ischemic encephalopathy]. *Journal of Roentgenology and Radiology*. 2013;1:19–24. (in Russian).
7. Murakami A., Morimoto M., Yamada K., Kizu O., Nishimura A., Nishimura T., Sugimoto T. Fiber-tracking techniques can predict the degree of neurologic impairment for periventricular leukomalacia. *Pediatrics*. 2008;122:500–506.
  8. Rose J., Mirmiran M., Butler E.E., Lin C.Y., Barnes P.D., Kermoian R., Stevenson D.K. Neonatal microstructural development of the internal capsule on diffusion tensor imaging correlates with severity of gait and motor deficits. *Dev Med Child Neurol*. 2007;49:745–750.
  9. deBruine F.T.D., Van Wezel-Meijler G., Leijser L.M., Steggerda S.J., Van Den Berg-Huysmans A.A., Rijken M., Van Buchem M.A., Van Der Grond J. Tractography and 2-year Follow-Up in Preterm Infants. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2013;55:427–433.
  10. Yermolina Yu.V. Osobennosti strukturnykh i funktsional'nykh izmeneniy golovnogo mozga u detey so spasticheskimi formami tserebral'nogo paralicha. [Features of structural and functional changes in the brain in children with spastic forms of cerebral palsy]. Diss. ... kand. med. nauk. Moskva; 2016. (in Russian).
  11. Kinney H.C., Armstrong D.L. Perinatal neuropathology. In Graham DI, Lantos PE, editors: *Greenfield's Neuropathology*. London; 2002.
  12. Kinney H.C., Brody B.A., Kloman A.S., Gilles F.H. Sequence of central nervous system myelination in human infancy. II. Patterns of myelination in autopsied infants. *J Neuropathol Exp Neurol*. 1988;47:217–234.
  13. Volpe J.J. Brain injury in premature infants: a complex amalgam of destructive and developmental disturbances. *Lancet Neurol*. 2009;8(1):110–124.