

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar660874>

EDN: WVSWMQ



Особенности магнитно-резонансной морфометрии в исследовании структур лобных долей у детей

Н.Н. Семибратов¹, В.А. Фокин², Г.Е. Труфанов², А.Ю. Ефимцев², К.Б. Абрамов²,
Г.В. Кондратьев³, А.Г. Левчук²

¹ Санкт-Петербургский клинический научно-практический центр специализированных видов медицинской помощи (онкологический) им. Н.П. Напалкова, Санкт-Петербург, Россия;

² Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Магнитно-резонансная морфометрия является высокоинформативным неинвазивным методом для ранней диагностики структурных изменений головного мозга, позволяющим оценивать их количественно и качественно. Лобные доли в процессе развития значительно увеличиваются в размерах, что связано с их важной ролью в когнитивных функциях и адаптации к окружающей среде. Исследование морфометрии лобных долей у детей может помочь в выявлении патологии и понимании нормальных процессов их развития в ранние годы жизни.

Цель — выявление особенностей изменения морфометрических характеристик структур лобных долей головного мозга у неврологически здоровых детей, а также анализ их зависимости от пола и возраста.

Материалы и методы. В исследование вошли 49 детей в возрасте от 6 месяцев до 18 лет. Все наблюдения были разделены на две возрастные группы: от 0 до 7 лет (17 человек), от 7 до 18 лет (32 человека). Была проведена автоматическая магнитно-резонансная морфометрия с помощью программного обеспечения FreeSurfer с определением морфометрических показателей: объема для каждой структуры лобной доли, площади поверхности и толщины коры.

Результаты. Полученные данные исследования продемонстрировали возрастные различия в объеме, площади и толщине различных структур лобных долей у детей. Статистически значимых половых различий в морфометрических показателях структур, представленных в данном исследовании возрастных групп, выявлено не было. Вместе с тем относительные размеры морфометрических показателей этих структур, рассчитанные относительно внутрочерепного объема, были больше у мальчиков, чем у девочек. Полученные результаты показывают как симметричные, так и асимметричные изменения, что подчеркивает разнонаправленную динамику развития структур лобных долей по мере взросления человека.

Заключение. Магнитно-резонансная морфометрия — эффективный метод выявления особенностей развития структур лобных долей головного мозга у неврологически здоровых детей. Представленные в работе морфометрические показатели могут быть использованы в качестве ориентировочных значений при изучении групп детей с нейродегенеративными заболеваниями.

Ключевые слова: головной мозг; дети; лобная доля; магнитно-резонансная морфометрия; магнитно-резонансная томография; рост и развитие; старение.

Как цитировать

Семибратов Н.Н., Фокин В.А., Труфанов Г.Е., Ефимцев А.Ю., Абрамов К.Б., Кондратьев Г.В., Левчук А.Г. Особенности магнитно-резонансной морфометрии в исследовании структур лобных долей у детей // Известия Российской военно-медицинской академии. 2025. Т. 44, № 2. С. 141–150. DOI: 10.17816/rmmar660874 EDN: WVSWMQ

DOI: <https://doi.org/10.17816/rmmar660874>

EDN: WVSWMQ

Magnetic Resonance Imaging-Based Frontal Lobe Morphometry in Pediatric Patients

Nikolay N. Semibratov¹, Vladimir A. Fokin², Gennadiy E. Trufanov², Aleksandr Yu. Efimtsev², Konstantin B. Abramov², Gleb V. Kondratiev³, Anatoly G. Levchuk²

¹ Saint Petersburg Clinical Scientific and Practical Center for Specialised Types of Medical Care (Oncological), Saint Petersburg, Russia;

² Almazov National Medical Research Centre, Saint Petersburg, Russia;

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Magnetic resonance imaging-based morphometry is a highly informative, noninvasive method for early diagnosis of structural brain changes, which facilitates their quantitative and qualitative evaluation. The frontal lobes increase significantly in size during brain development, which is associated with their important role in cognitive functions and environmental adaptations. Frontal lobe morphometry in pediatric patients can be used to identify abnormalities and understand normal developmental processes in early childhood.

AIM: To identify any changes in the morphometry of the frontal lobes in neurologically healthy children and to analyze how these changes may vary across sex and age groups.

METHODS: The study included 49 children aged 6 months to 18 years. The observations were categorized into two age groups: from 0 to 7 years (17 children) and from 7 to 18 years (32 children). Automatic magnetic resonance imaging-based morphometry was performed with FreeSurfer software used to determine morphometric parameters, including frontal lobe volume, surface area, and cortical thickness.

RESULTS: The findings showed age-related variations in the frontal lobe volume, area, and thickness. There were no significant sex-specific differences in the morphometric parameters between the age groups. However, relative values of the morphometric parameters calculated as a percentage of intracranial volume were higher in boys than in girls. The obtained results demonstrate both symmetrical and asymmetrical changes, thereby underscoring the multidirectional nature of the frontal lobe development during human growth.

CONCLUSION: Magnetic resonance imaging-based morphometry is a highly effective method for identifying the developmental patterns of the frontal lobes in neurologically healthy children. The morphometric parameters outlined in this study may serve as reference values in the assessment of pediatric populations diagnosed with neurodegenerative diseases.

Keywords: brain; children; frontal lobe; magnetic resonance imaging-based morphometry; magnetic resonance imaging; growth and development; aging.

To cite this article

Semibratov NN, Fokin VA, Trufanov GE, Efimtsev AY., Abramov KB, Kondratiev GV, Levchuk AG. Magnetic Resonance Imaging-Based Frontal Lobe Morphometry in Pediatric Patients. *Russian Military Medical Academy Reports*. 2025;44(2):141–150. DOI: 10.17816/rmmar660874 EDN: WVSWMQ

Submitted: 21.03.2025

Accepted: 10.04.2025

Published: 30.06.2025

АКТУАЛЬНОСТЬ

Головной мозг в процессе развития претерпевает значительные морфометрические изменения на протяжении всего онтогенеза, особенно в детском возрасте. Эти изменения зависят от возраста и пола ребенка [1–3]. Наиболее интенсивное развитие нервной системы наблюдается в течение первых трех месяцев жизни. К 3 годам достигается дифференцировка нервных клеток, характеризующаяся ростом аксонов, их миелинизацией, а также ростом и увеличением разветвленности дендритов. К 8 годам структура коры головного мозга соответствует структуре коры взрослого человека [4]. Объем мозга достигает наивысшего уровня в возрасте 10,5 лет у девочек и 14,5 лет у мальчиков [2]. У взрослых мужчин объем мозга в среднем на 7–10% больше по сравнению с женщинами [1–2, 5].

Лобные доли, одни из самых развитых областей головного мозга, в процессе развития значительно увеличиваются в размерах. У взрослого человека префронтальная кора составляет почти треть от общей площади неокортекса. Позднее созревание префронтальной коры объясняется поздней миелинизацией ее аксональных соединений. Этот и другие показатели морфологического развития префронтальной коры связаны с ее важной ролью в когнитивных функциях и адаптацией к окружающей среде [6]. По данным магнитно-резонансной томографии (МРТ), объем серого вещества в лобных долях достигает максимума примерно в возрасте 11 лет у девочек и 12 лет у мальчиков [7].

Магнитно-резонансная морфометрия (MP-морфометрия) — автоматизированный и операторнезависимый метод нейровизуализационного анализа, позволяющий получать количественные данные об объеме для каждой структуры головного мозга, площади поверхности и толщины коры [8]. В настоящем исследовании представлены результаты морфометрического анализа, которые отражают влияние возраста и пола на развитие лобных долей головного мозга у детей. Понимание траектории возрастных морфометрических изменений при нормальном развитии головного мозга, а также половых различий имеет большое значение для интерпретации данных визуализационных исследований в клинической практике.

Цель исследования — изучение нормального развития лобных долей у детей без неврологической патологии с помощью MP-морфометрии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на базе ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России. Исследование включало ретроспективный и проспективный этапы обработки информации о пациентах в период с сентября 2016-го по май 2024 г.

В исследование вошли 49 детей (30 мальчиков, 19 девочек) возрастом от 2 мес до 18 лет без видимых на МРТ

изменений структуры головного мозга и клинических симптомов. Средний возраст составил $7,94 \pm 5,08$ года. Исследование проводилось с письменного согласия родителей пациентов. Анестезиологическое обеспечение применялось в случаях невозможности проведения исследования без анестезии.

Описание медицинского исследования

Всем обследуемым была проведена МРТ головного мозга на томографах с индукцией магнитного поля 1,5 и 3 Тесла по стандартизированному протоколу исследования головного мозга с применением стандартных импульсных последовательностей в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (T1-, T2-, TIRM), а также 3D T1-MPRAGE (Magnetization Prepared Rapid Acquisition Gradient Echo) — T1-импульсная последовательность градиентного эха с ускоренным сбором данных со следующими параметрами: время повторения (TR) — 2000 мс, время эха (TE) — 4,38 мс, угол отклонения (FA) — 10° , FOV — 250 мм, матрица — 256×256 , толщина среза — 1 мм, количество срезов — 160, время сканирования — 11 мин. С помощью программного обеспечения FreeSurfer 7.3.2 была проведена автоматическая MP-морфометрия с определением морфометрических показателей: объема (мм^3), площади (мм^2) и толщины (мм) для каждой структуры лобных долей [9]. Постпроцессинговая обработка состояла из нескольких последовательных этапов. Подготовительный этап включал линейное преобразование Талайраха, нормализацию интенсивности, удаление черепа и внемозговых тканей с помощью поверхностной деформации, отделение мозжечка и ствола мозга от головного мозга и разделение левого и правого полушарий [9]. Алгоритм деформируемой поверхности использовался для определения внутренних (серо-белых) и пиальных (серо-ликворных) поверхностей коры [8]. Автоматизированная топологическая коррекция, сферизация поверхности и регистрация в сферическом атласе также были включены в поток обработки [10]. Рассчитанные морфометрические показатели объема, площади поверхности и толщины структур лобных долей сравнивались и описывались в соответствии со встроеным атласом Desikan–Killiany [11].

Все наблюдения были разделены на две возрастные группы: от 0 до 7 лет (17 человек), от 7 до 18 лет (32 человека). Выбор конкретных интервалов возрастных групп для анализа обусловлен необходимостью выявить ключевые возрастные изменения морфометрических показателей структур лобных долей, происходящие в эти критически важные периоды развития.

Статистический анализ был выполнен с использованием программного обеспечения Jamovi 2.3.28 и Microsoft Excel 2007 [12, 13]. Была проведена статистическая обработка полученных данных для определения статистически значимых отклонений между группами. Количественные данные были описаны с использованием среднего значения и стандартного отклонения. Для сравнения

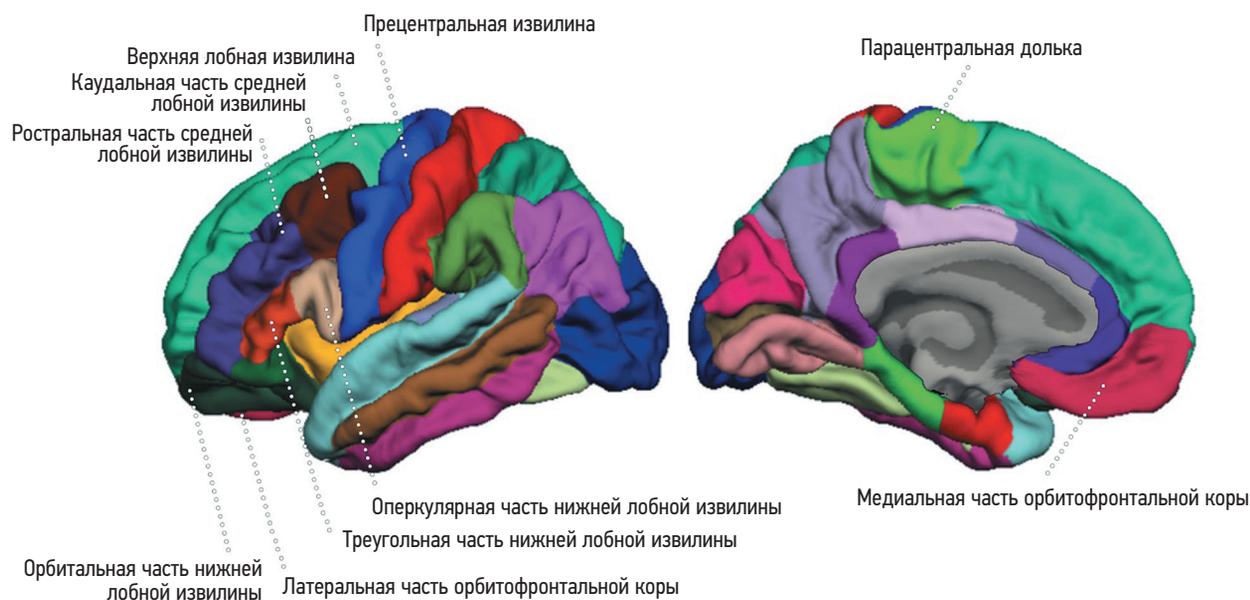


Рис. 1. Структуры лобной доли, используемые в атласе Desikan–Killiany: верхнелатеральная (слева) и нижнемедиальная (справа) поверхности. Адаптированная иллюстрация A. Klein, J. Tourville [11], <https://mindboggle.info/data>.

результатов между группами использовался непараметрический *U*-критерий Манна–Уитни, что позволило учесть возможные выбросы и асимметрию в данных. Графическое изображение полученных результатов сегментации церебральных структур с помощью программного пакета FreeSurfer показано на рис. 1. Был проведен анализ линейной регрессии и определено процентное изменение средних значений для оценки трендов в изменении морфометрических показателей (объема (мм³), площади (мм²) и толщины (мм)) структур лобных долей. Для вычисления процентного изменения средних значений использовали формулу:

$$\Delta P = ((M_{\text{end}} - M_{\text{start}}) / M_{\text{start}}) \times 100\%,$$

где ΔP — процентное изменение; M_{end} — конечное среднее значение; M_{start} — начальное среднее значение.

Для систематизации данных и последующего сравнительного анализа мы определили процентные диапазоны для различных уровней выраженности изменений морфометрических показателей структур лобных долей. Изменения до 10% классифицированы как маловыраженные, изменения от 10 до 30% — как выраженные, а изменения свыше 30% — как значительные. Симметричность оценивалась по следующим критериям: разница морфометрических показателей контрлатеральных структур до 10% считалась симметричной, в то время как разница более 10% указывала на асимметрию.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На этапе сравнения данных двух групп, полученных с помощью МР-морфометрии, были обнаружены изменения в структурах лобных долей головного мозга.

Общие изменения структур лобных долей. Средние значения морфометрических показателей структур

лобных долей при сравнении исследуемых возрастных групп представлены в табл. 1 и на рис. 2. Процентное изменение средних значений объема (мм³), площади поверхности (мм²) и толщины структур (мм) лобных долей при сравнении исследуемых возрастных групп представлено на рис. 3.

Верхняя лобная извилина. В ходе исследования было выявлено значительное развитие правой верхней лобной извилины по сравнению с левой как по объему, так и по площади и толщине в рассматриваемых возрастных группах: от 0 до 7 и от 7 до 18 лет. В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема правой (на 26,6%) и левой (на 20,27%) верхних лобных извилин. Аналогично объему, площадь поверхности верхних лобных извилин также демонстрирует выраженное симметричное увеличение правой (на 17,3%) и левой (на 14,76%) верхних лобных извилин. Увеличение толщины правой и левой верхних лобных извилин наблюдается в меньшей степени (на 10,61 и 8,89% соответственно).

Средняя лобная извилина. Было установлено, что морфометрические показатели объема, площади и толщины правой средней лобной извилины превосходят аналогичные значения левой средней лобной извилины в анализируемых возрастных группах. Траектории изменений показателей ростральной и каудальной частей средней лобной извилины указывают на различия в процессе развития мозга. Ростральная часть средней лобной извилины увеличивается как за счет объема, так и за счет площади, в то время как увеличение каудальной части обусловлено преимущественно за счет увеличения объема. Морфометрические показатели объема, площади и толщины правой средней лобной извилины преобладают над значениями левой средней лобной извилины. В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное

Таблица 1. Сравнение морфометрических показателей лобных долей

Структура	Показатель	Группа 1 (0–7 лет, n=17)	Группа 2 (7–18 лет, n=32)	ΔP , %	<i>U</i>	<i>p</i>
Правая верхняя лобная извилина	Объем, мм ³	27985±10527	35430±3058	26,60	142	0,006*
	Площадь, мм ²	8712±2415	10219±836	17,30	144	0,007*
	Толщина, мм	2,64±0,435	2,92±0,116	10,61	186	0,073
Левая верхняя лобная извилина	Объем, мм ³	26302±9138	31633±3247	20,27	188	0,079
	Площадь, мм ²	7764±2093	8910±877	14,76	179	0,051
	Толщина, мм	2,70±0,414	2,94±0,143	8,89	189	0,083
Ростральная часть правой средней лобной извилины	Объем, мм ³	12571±5191	15494±2172	23,25	173	0,038*
	Площадь, мм ²	3970±1439	4858±739	22,37	154	0,013*
	Толщина, мм	2,56±0,381	2,65±0,133	3,52	271	0,983
Ростральная часть левой средней лобной извилины	Объем, мм ³	12873±4894	14873±2060	15,54	217	0,255
	Площадь, мм ²	3872±1274	4597±679	18,72	143	0,006*
	Толщина, мм	2,58±0,414	2,64±0,130	2,33	248	0,622
Каудальная часть правой средней лобной извилины	Объем, мм ³	6274±2470	7615±1813	21,37	190	0,087
	Площадь, мм ²	2205±754	2389±500	8,34	239	0,499
	Толщина, мм	2,53±0,439	2,80±0,157	10,67	185	0,068
Каудальная часть левой средней лобной извилины	Объем, мм ³	6914±2386	8331±1336	20,49	176	0,044*
	Площадь, мм ²	2345±706	2665±429	13,65	185	0,069
	Толщина, мм	2,57±0,346	2,76±0,119	7,39	200	0,134
Орбитальная часть правой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	2514±908	3058±423	21,64	163	0,023*
	Площадь, мм ²	713±220	837±118	17,39	174	0,040*
	Толщина, мм	2,78±0,443	2,91±0,133	4,68	264	0,875
Орбитальная часть левой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	2499±731	2891±398	15,69	180	0,054
	Площадь, мм ²	709±158	818±96	15,37	152	0,012*
	Толщина, мм	2,75±0,425	2,85±0,159	3,64	268	0,933
Треугольная часть правой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	4304±1828	5542±853	28,76	149	0,009*
	Площадь, мм ²	1476±468	1734±292	17,48	175	0,043*
	Толщина, мм	2,51±0,454	2,73±0,138	8,76	232	0,407
Треугольная часть левой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	4392±1826	5827±906	32,67	143	0,006*
	Площадь, мм ²	1596±451	1851±303	15,98	156	0,014*
	Толщина, мм	2,37±0,518	2,70±0,128	13,92	182	0,060
Оперкулярная часть правой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	4505±1524	5643±798	25,26	129	0,002*
	Площадь, мм ²	1575±424	1747±230	10,92	184	0,066
	Толщина, мм	2,54±0,430	2,85±0,124	12,20	154	0,014*
Оперкулярная часть левой нижней лобной извилины	Объем, мм ³	4557±1996	5529±1081	21,33	153	0,012*
	Площадь, мм ²	1523±494	1702±315	11,75	187	0,076
	Толщина, мм	2,52±0,522	2,82±0,123	11,90	156	0,015*
Латеральная часть правой орбитофронтальной коры	Объем, мм ³	9444±4147	10593±1175	12,17	196	0,113
	Площадь, мм ²	2820±1208	3305±383	17,20	153	0,012*
	Толщина, мм	2,76±0,444	2,75±0,166	-0,36	191	0,091
Латеральная часть левой орбитофронтальной коры	Объем, мм ³	9072±2841	10650±1149	17,39	167	0,027*
	Площадь, мм ²	2585±703	3377±281	30,64	68	< 0,001*
	Толщина, мм	2,84±0,355	2,72±0,195	-4,23	143	0,007*
Медиальная часть правой орбитофронтальной коры	Объем, мм ³	4597±1700	5382±492	17,08	229	0,376
	Площадь, мм ²	1397±402	1695±128	21,33	111	< 0,001*
	Толщина, мм	2,62±0,394	2,62±0,146	0,00	212	0,211
Медиальная часть левой орбитофронтальной коры	Объем, мм ³	4804±1477	5493±553	14,34	207	0,177
	Площадь, мм ²	1429±332	1782±163	24,70	73	< 0,001*
	Толщина, мм	2,64±0,361	2,57±0,165	-2,65	169	0,031*
Правая прецентральный извилина	Объем, мм ³	12725±3838	14869±1492	16,85	171	0,034*
	Площадь, мм ²	4884±1222	4953±473	1,41	254	0,716
	Толщина, мм	2,38±0,377	2,70±0,160	13,45	124	0,001*
Левая прецентральный извилина	Объем, мм ³	12357±3855	15265±1797	23,53	121	0,001*
	Площадь, мм ²	4797±1086	5113±569	6,59	244	0,567
	Толщина, мм	2,37±0,356	2,70±0,166	13,92	108	< 0,001*

Продолжение таблицы 1

Структура	Показатель	Группа 1 (0–7 лет, n=17)	Группа 2 (7–18 лет, n=32)	ΔP , %	U	p
Правая парацентральная доля	Объем, мм ³	4340±1481	5263±533	21,27	114	< 0,001*
	Площадь, мм ²	1616±376	1776±198	9,90	194	0,104
	Толщина, мм	2,42±0,448	2,70±0,146	11,57	172	0,036*
Левая парацентральная доля	Объем, мм ³	4594±1376	5537±706	20,53	146	0,007*
	Площадь, мм ²	1676±372	1857±218	10,80	193	0,097
	Толщина, мм	2,42±0,335	2,69±0,146	11,16	128	0,002*

Примечание. Значения объема структур (мм³), площади поверхности структур (мм²), толщины структур (мм), выраженные как среднее±стандартное отклонение (Mean±SD) для каждой возрастной группы; ΔP — процентное изменение; U — U-критерий Манна–Уитни; * p < 0,05.

увеличение объема ростральной части правой (на 23,25%) и левой (на 15,54%) средних лобных извилин. Аналогично объему, площадь поверхности также демонстрирует выраженное симметричное увеличение ростральной части правой (на 22,37%) и левой (на 18,72%) средних лобных извилин. Толщина ростральной части правой и левой средних лобных извилин с обеих сторон увеличивается незначительно (на 3,52 и 2,33% соответственно). В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема каудальной части правой (на 21,37%) и левой (на 20,49%) средних лобных извилин при сравнении двух возрастных групп. Однако по сравнению с объемными изменениями площадь поверхности демонстрирует менее выраженное симметричное увеличение каудальной части правой (на 8,34%) и левой (на 13,65%) средних лобных извилин. Толщина каудальной части правой и левой средних лобных извилин с обеих сторон увеличивается мало выражено (на 10,67 и 7,39% соответственно).

Нижняя лобная извилина. В ходе исследования отмечалось значительное развитие правой нижней лобной извилин по сравнению с левой, что проявляется в увеличении объема, площади и толщины в рассматриваемых возрастных группах. Изменения объема и площади нижней лобной извилин демонстрируют симметричный характер в правом и левом полушариях.

Орбитальная часть нижней лобной извилин. В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема орбитальной части правой (на 21,64%) и левой (на 15,69%) нижних лобных извилин при сравнении двух возрастных групп. Аналогично объему, площадь поверхности также демонстрирует выраженное симметричное увеличение орбитальной части правой (на 17,39%) и левой (на 15,37%) нижних лобных извилин. Увеличение толщины орбитальной части правой и левой средних лобных извилин наблюдается в меньшей степени (на 4,68 и 3,64% соответственно).

Треугольная часть нижней лобной извилин. В обоих полушариях определяется выраженное симметричное увеличение объема треугольной части правой (на 28,76%) и левой (на 32,67%) нижних лобных извилин при сравнении двух возрастных групп. Площадь поверхности также демонстрирует выраженное симметричное увеличение треугольной части правой (на 17,48%) и левой (на 15,98%)

нижних лобных извилин. Толщина треугольной части правой и левой средних лобных извилин с обеих сторон увеличивается менее выражено (на 8,76 и 13,92% соответственно).

Оперкулярная часть нижней лобной извилин. В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема оперкулярной части правой (на 25,26%) и левой (на 21,33%) нижних лобных извилин при сравнении двух возрастных групп. Площадь поверхности также демонстрирует выраженное симметричное увеличение оперкулярной части правой (на 10,92%) и левой (на 11,75%) нижних лобных извилин. Увеличение толщины оперкулярной части правой и левой нижних лобных извилин наблюдается в меньшей степени (на 12,20 и 11,90% соответственно).

Орбитофронтальная кора: латеральная и медиальная части. В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема латеральной части правой (на 12,17%) и левой (на 17,39%) орбитофронтальной коры при сравнении двух возрастных групп. Площадь поверхности демонстрирует выраженное асимметричное увеличение латеральной части правой (на 17,20%) и значительно большее левой (на 30,64%) орбитофронтальной коры. Толщина латеральной части правой орбитофронтальной коры незначительно уменьшилась (на 0,36%), тогда как у левой наблюдается более выраженное снижение — (на 4,23%). В обоих полушариях наблюдается выраженное симметричное увеличение объема медиальной части правой (на 17,08%) и левой (на 14,34%) орбитофронтальной коры при сравнении двух возрастных групп. Площадь поверхности медиальной части орбитофронтальной коры выражено симметрично увеличивается справа (на 21,33%) и слева (на 24,7%). Толщина медиальной части правой и левой орбитофронтальной коры справа остается без изменений (0%), тогда как у левой наблюдается снижение (на 2,65%).

Прецентральная извилина. Наблюдалось более выраженное развитие левой прецентральной извилин по сравнению с правой, что проявляется в увеличении объема, площади и толщины в анализируемых возрастных группах. В обоих полушариях отмечается симметричное увеличение объема правой (на 16,85%) и левой (на 23,53%) прецентральных извилин. Площадь

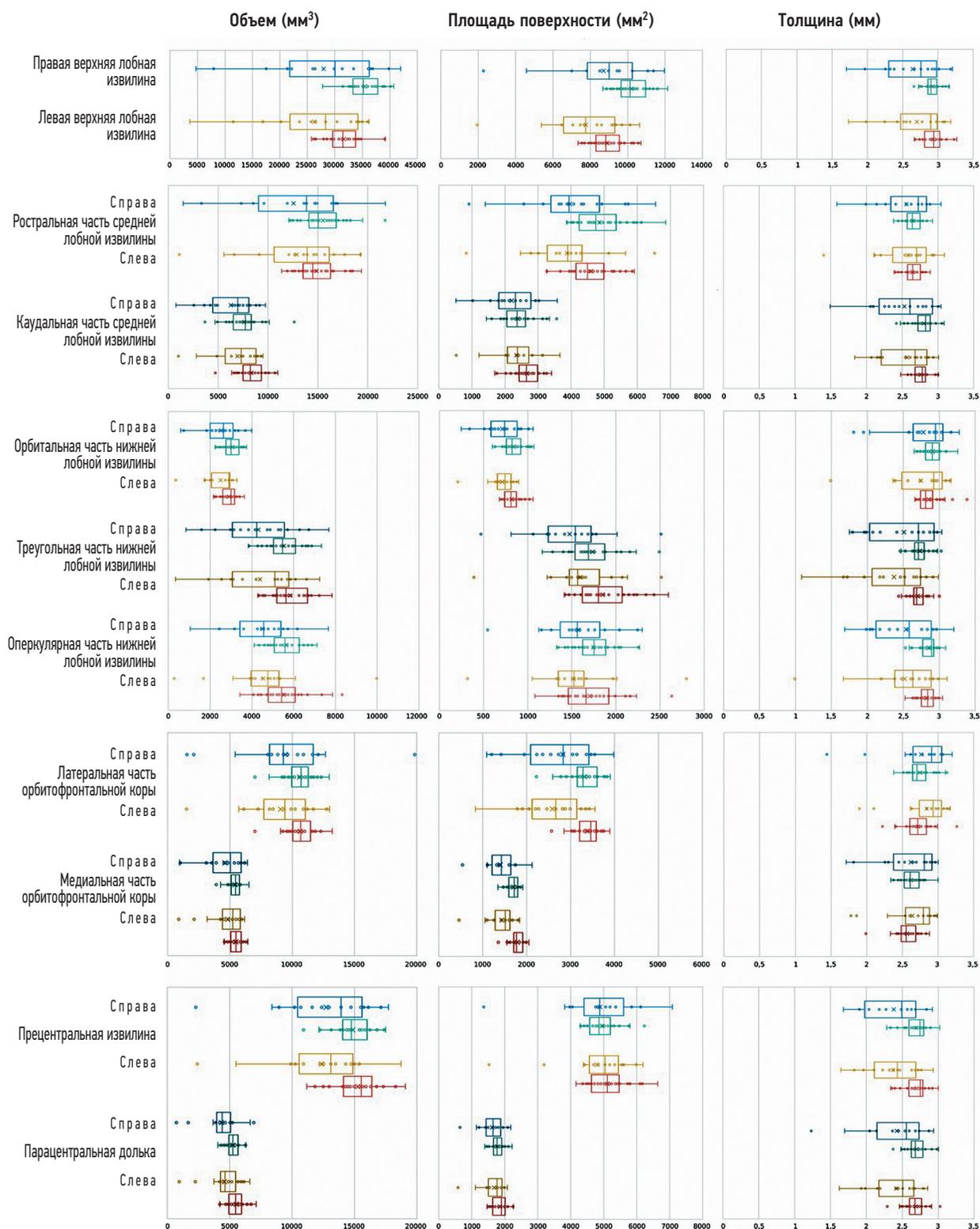


Рис. 2. Значения объема, мм^3 (слева), площади поверхности, мм^2 (в центре), и толщины, мм (справа) структур лобных долей для возрастных групп 0–7 лет (верхние столбцы) и 7–18 лет (нижние столбцы). Вертикальные линии обозначают медианы, левые и правые границы прямоугольников указывают на нижний и верхний квантили соответственно.

поверхности прецентральных извилин также демонстрирует маловыраженное симметричное увеличение правой (на 1,41%) и левой (на 6,59%) прецентральных извилин. Толщина правой и левой прецентральных извилин с обеих

сторон увеличивается симметрично и более выражено (на 13,45 и 13,92% соответственно).

Парацентральная доля. Исследование показало выраженное развитие парацентральных долек как по

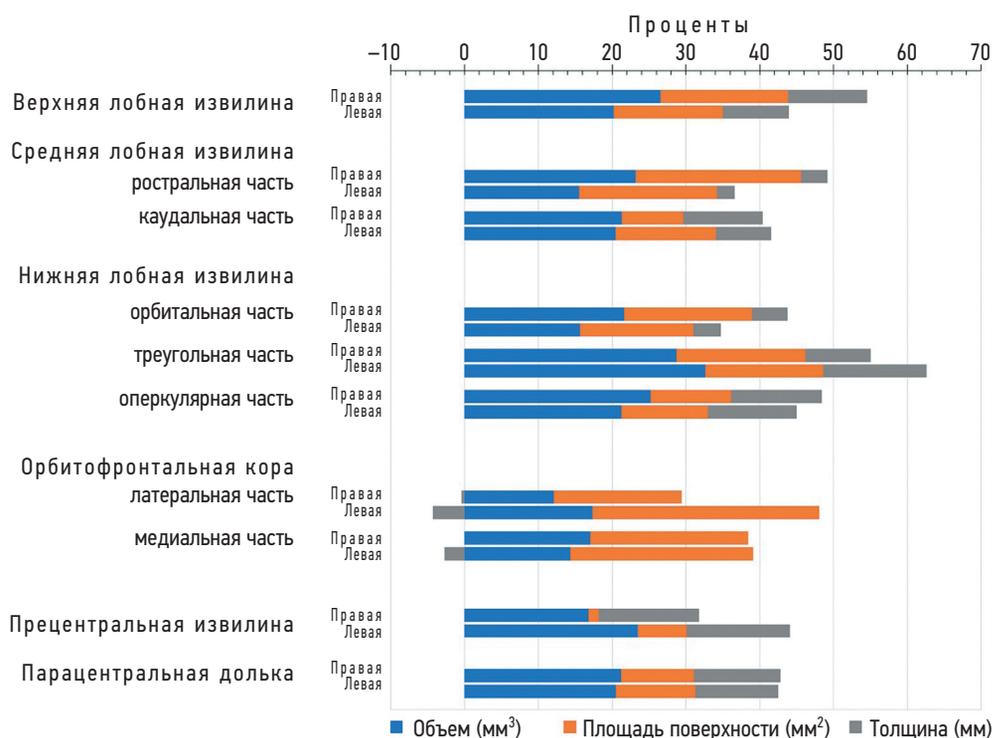


Рис. 3. Процентное изменение средних значений объема (мм³), площади поверхности (мм²) и толщины структур (мм) при сравнении возрастных групп 0–7 лет и 7–18 лет.

объему, так и по площади и толщине в обеих возрастных группах. Морфометрические показатели объема парацентральных долек симметрично увеличиваются справа (на 21,27%) и слева (на 20,53%). Аналогично объему, площадь поверхности парацентральных долек также демонстрирует выраженное симметричное увеличение правой (на 9,90%) и левой (на 10,80%) парацентральных долек. Толщина правой и левой парацентральных долек с обеих сторон увеличивается более выраженно (на 11,57 и 11,16% соответственно).

Половые различия. В ходе сравнительного анализа гендерных различий морфометрических показателей объема, площади и толщины структур лобных долей с учетом процентного соотношения этих морфометрических показателей к общему внутрочерепному объему не было выявлено статистически значимых различий между исследуемыми возрастными группами: от 0 до 7 лет и от 7 до 18 лет ($p < 0,05$). Тем не менее наблюдалась тенденция к большему относительному размеру морфометрических показателей структур лобных долей у мальчиков по сравнению с девочками, хотя эта тенденция не достигла статистической значимости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Морфометрические показатели объема структур, площади и толщины коры лобных долей значительно различаются у детей разных возрастных групп. Эти различия отражают процессы созревания мозга, такие как миелинизация, синаптогенез, рост и дифференцировка нервных

клеток. Темп развития нервной системы особенно высокий в течение первых 3 мес жизни. Дифференцировка нервных клеток достигается к 3 годам, а к 8 годам кора головного мозга по строению похожа на кору взрослого человека. Первый период, 0–7 лет, охватывает раннее детство, когда происходит интенсивное развитие мозга, и связан с интенсивным формированием нейронных связей и структурной организацией коры головного мозга. В свою очередь, второй рассматриваемый период, 7–18 лет, охватывает подростковый возраст, когда происходят значительные изменения в нейроанатомии и функциональности мозга. Этот возрастной интервал является периодом активного обучения и социализации, что также оказывает влияние на морфометрические показатели. Сравнение данных групп позволяет выявить ключевые изменения в морфометрии лобных долей, которые происходят в результате естественного развития и воздействия окружающей среды.

Результаты нашего исследования согласуются с выводами, представленными в работе Simon Ducharme с соавт. (2016) [14]. В частности, наблюдалась тенденция к уменьшению толщины коры с возрастом в большинстве исследованных участков. Существующие исследования показывают, что морфометрические особенности лобных долей оказывают влияние на когнитивные функции, эмоциональную регуляцию и социальное поведение. Выявленная тенденция более выраженного увеличения морфометрических показателей структур лобных долей у мальчиков по сравнению с девочками подчеркивает необходимость дальнейшего изучения половых различий с использованием методов МР-морфометрии. Наши данные согласуются с существующей

литературой о половом диморфизме в морфометрических показателях мозга; в частности, отмечено, что мальчики характеризуются большим общим объемом головного мозга по сравнению с девочками [15]. Как отмечают некоторые исследователи, размеры структур головного мозга могут служить ценным инструментом для раннего выявления аномалий развития [14, 16]. Наши данные сопоставимы с результатами МР-морфометрических исследований нейродегенеративных заболеваний (эпилепсии, в частности), представленными в обзоре Е.Г. Потемкиной и соавт. [17], что свидетельствует о перспективности данного направления исследований.

В научном сообществе хорошо известны сложности, связанные с проведением исследований головного мозга у клинически здоровых детей. Ограничение числа участников в исследовании в основном связано с проблемами небольшого количества исследований головного мозга у детей без неврологической симптоматики, с трудностями в получении согласия от родителей на участие детей в исследовании, а также проблемой неподвижности детей при проведении исследования для получения качественных изображений без двигательных артефактов. Однако результаты таких исследований могут помочь в понимании развития головного мозга и диагностике неврологических расстройств у детей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью МР-морфометрии были выявлены возрастные и половые особенности изменения структур в объеме, площади и толщине различных структур лобных долей у детей, что делает МР-морфометрию одним из возможных методов изучения нейродегенеративных заболеваний у детей. В целом морфометрические показатели структур лобных долей были больше у мальчиков, чем у девочек. Для изучения гендерных различий в продолжение исследования планируется увеличить численность обследуемых и осуществить анализ данных, охватывающий несколько возрастных групп.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Вклад каждого автора: Н.Н. Семибратов — концепция и дизайн исследования, анализ и интерпретация полученных данных, написание текста, подготовка, создание опубликованной работы; В.А. Фокин — контроль выполнения всех этапов исследовательской работы, утверждение окончательного варианта статьи; Г.Е. Труфанов — консультативная помощь на всех этапах выполнения работы, итоговый вариант редактирования текста работы; А.Ю. Ефимцев — консультативная помощь на всех этапах выполнения работы, обработка результатов, редактирование текста работы; К.Б. Абрамов, Г.В. Кондратьев — сбор и обработка данных, редактирование текста работы; А.Г. Левчук — сбор и обработка данных, обработка изображения.

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

Этическая экспертиза. Исследование проводилось в рамках диссертационной работы, одобренной локальным этическим комитетом (ЛЭК) ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», выписка № 29 из протокола заседания ЛЭК от 12.02.2018 г. Все участники исследования до включения в исследование добровольно подписали форму информированного согласия, утвержденную в составе протокола исследования этическим комитетом.

Раскрытие интересов авторов. Авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные), за исключением иллюстрации структур лобной доли (рис. 1), заимствованной и адаптированной из работы Klein A. и Tourville J. [11] (распространяется на условиях лицензии CC-BY 3.0).

Доступ к данным. Доступ к данным, полученным в настоящем исследовании, закрыт по причине конфиденциальности.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

ADDITIONAL INFO

Author contributions: All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution of each author: N.N. Semibratov: conceptualization and methodology, data analysis and interpretation, writing—original draft, preparation, creation of the published work; V.A. Fokin: supervision of the research stages execution, approval of the final version; G.E. Trufanov: advisory assistance at all stages of the work, editing of the final version; A.Yu. Efimtsev: advisory assistance at all stages of the work, data processing, writing—review & editing; K.B. Abramov, G.V. Kondratiev: data collection and processing, writing—review & editing; A.G. Levchuk: data collection and processing, image processing.

Funding sources: The authors declare no external funding was received for the study.

Ethics approval: The research was conducted as part of a dissertation thesis approved by the Local Ethics Committee of the Federal State Budgetary Institution Almazov National Medical Research Center, Abstract No. 29 of Local Ethics Committee Protocol, dated February 12, 2018. All study participants provided a written informed consent before being included in the study, which was approved by the Local Ethics Committee as part of the study protocol.

Disclosure of interests: The authors declare no potential conflict of interest to be disclosed in this article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data), except for frontal lobe images (Fig. 1), which were adapted from Klein A. and Tourville J. [11] (distributed under CC-BY 3.0 license), was used in this study.

Data availability statement: Access to the data obtained in this study is restricted due to confidentiality reasons.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Giedd JN, Castellanos FX, Rajapakse JC, et al. Sexual dimorphism of the developing human brain. *Prog Neuropsychopharmacol Biol Psychiatry*. 1997;21(8):1185–1201. doi: 10.1016/s0278-5846(97)00158-9
2. Lenroot RK, Gogtay N, Greenstein DK, et al. Sexual Dimorphism of Brain Developmental Trajectories during Childhood and Adolescence. *Neuroimage*. 2007;36(4):1065–1073. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.03.053
3. Wilke M, Schmithorst VJ, Holland SK. Assessment of spatial normalization of whole-brain magnetic resonance images in children. *Hum Brain Mapp*. 2002;17(1):48–60. doi: 10.1002/hbm.10053
4. Voronova NV, Klimova NM, Mendgeritsky AM. *Anatomy of the Central Nervous System: A Textbook for University Students Specializing in Psychology*. Moscow: Aspect Press; 2005. EDN: QKNXWP
5. Sowell ER, Trauner DA, Gamst A, Jernigan TL. Development of cortical and subcortical brain structures in childhood and adolescence: a structural MRI study. *Developmental Medicine & Child Neurology*. 2002;44(1):4–16. doi: 10.1111/j.1469-8749.2002.tb00253.x EDN: ECHQFN
6. Dekaban AS, Sadowsky D. Changes in brain weights during the span of human life: Relation of brain weights to body heights and body weights. *Annals of Neurology*. 1978;4(4):345–356. doi: 10.1002/ana.410040410
7. Giedd JN. Structural magnetic resonance imaging of the adolescent brain. *Ann N Y Acad Sci*. 2004;1021:77–85. doi: 10.1196/annals.1308.009
8. Fischl B, Salat DH, Busa E, et al. Whole brain segmentation: automated labeling of neuroanatomical structures in the human brain. *Neuron*. 2002;33(3):341–355. doi: 10.1016/s0896-6273(02)00569-x
9. Fischl B. FreeSurfer. *Neuroimage*. 2012;62(2):774–781. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.021
10. Fischl B, Sereno MI, Dale AM. Cortical surface-based analysis. II: Inflation, flattening, and a surface-based coordinate system. *Neuroimage*. 1999;9(2):195–207. doi: 10.1006/nimg.1998.0396
11. Klein A, Tourville J. 101 Labeled Brain Images and a Consistent Human Cortical Labeling Protocol. *Front Neurosci*. 2012;6:171. doi: 10.3389/fnins.2012.00171
12. The jamovi project. jamovi. Version 2.5 [Computer Software] — [cited 2025 Jan 25]. Available from: <https://www.jamovi.org>
13. Microsoft Corporation. Microsoft Excel. Version 16.88 [Computer Software]. — [cited 2025 Jan 25]. Available from: <https://www.microsoft.com>
14. Ducharme S, Albaugh MD, Nguyen TV, et al. Trajectories of cortical thickness maturation in normal brain development — The importance of quality control procedures. *Neuroimage*. 2016;125:267–279. doi: 10.1016/j.neuroimage.2015.10.010
15. Brain Development Cooperative Group. Total and regional brain volumes in a population-based normative sample from 4 to 18 years: the NIH MRI Study of Normal Brain Development. *Cereb Cortex*. 2012;22(1):1–12. doi: 10.1093/cercor/bhr018
16. Brouwer RM, Schutte J, Janssen R, et al. The Speed of Development of Adolescent Brain Age Depends on Sex and Is Genetically Determined. *Cereb Cortex*. 2021;31(2):1296–1306. doi: 10.1093/cercor/bhaa296 EDN: RLRLEU
17. Potemkina EG, Salomatina TA, Andreev EV, et al. MR morphometry in epileptology: progress and perspectives. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2023;87(3):113–119. doi: 10.17116/neiro202387031113 EDN: PAVJVV

ОБ АВТОРАХ

Семибратов Николай Николаевич, врач-рентгенолог;
ORCID: 0000-0002-0034-7413; eLibrary SPIN: 9179-7660;
e-mail: nsemibr@gmail.com

Фокин Владимир Александрович, докт. мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0001-7885-9024; eLibrary SPIN: 5939-5198;
e-mail: vladfokin@mail.ru

Труфанов Геннадий Евгеньевич, докт. мед. наук, профессор;
ORCID: 0000-0002-1611-5000; eLibrary SPIN: 3139-3581;
e-mail: trufanovge@mail.ru

Ефимцев Александр Юрьевич, докт. мед. наук, профессор
кафедры; ORCID: 0000-0003-2249-1405;
eLibrary SPIN: 3459-2168; e-mail: atralf@mail.ru

Абрамов Константин Борисович, канд. мед. наук;
ORCID: 0000-0002-1290-3659; eLibrary SPIN: 5615-4624;
e-mail: kalyghanin@mail.ru

Кондратьев Глеб Валентинович, врач — детский онколог,
ассистент кафедры; ORCID: 0000-0002-1462-6907;
eLibrary SPIN: 9092-3185; e-mail: spbgvk@mail.ru

***Левчук Анатолий Геннадьевич**; адрес: Россия, 197341,
Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, д. 2; ORCID: 0000-0002-8848-3136;
eLibrary SPIN: 6214-5934; e-mail: feuerlag999@yandex.ru

AUTHORS' INFO

Nikolay N. Semibratov, MD, radiologist;
ORCID: 0000-0002-0034-7413; eLibrary SPIN: 9179-7660;
e-mail: nsemibr@gmail.com

Vladimir A. Fokin, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0001-7885-9024; eLibrary SPIN: 5939-5198;
e-mail: vladfokin@mail.ru

Gennady E. Trufanov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;
ORCID: 0000-0002-1611-5000; eLibrary SPIN: 3139-3581;
e-mail: trufanovge@mail.ru

Alexander Yu. Efimtsev, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor of the
Department; ORCID: 0000-0003-2249-1405;
eLibrary SPIN: 3459-2168; e-mail: atralf@mail.ru

Konstantin B. Abramov, MD, Cand. Sci. (Medicine);
ORCID: 0000-0002-1290-3659; eLibrary SPIN: 5615-4624;
e-mail: kalyghanin@mail.ru

Gleb V. Kondratiev, MD, Pediatric Oncologist, Assistant Professor
of the Department; ORCID: 0000-0002-1462-6907;
eLibrary SPIN: 9092-3185; e-mail: spbgvk@mail.ru

***Anatoly G. Levchuk**; address: 2, Akkuratova str., Saint Petersburg,
197341, Russia; ORCID: 0000-0002-8848-3136;
eLibrary SPIN: 6214-5934; e-mail: feuerlag999@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author