



МЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Научная статья.

УДК 616-007.21

<https://doi.org/10.52560/2713-0118-2022-1-63-76>

Автоматический алгоритм магнитно-резонансной морфометрии в диагностике фокальной кортикальной дисплазии

А. М. Шевченко*, Э. Л. Погосбекян, А. И. Баталов, Е. И. Шульц,
А. Н. Тюрина, Л. М. Фадеева, М. В. Шевченко, П. А. Власов,
Н. Е. Захарова, А. Г. Меликян, И. Н. Пронин

ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России,
Москва

Реферат

Целью исследования было создание оригинального алгоритма МР-морфометрии для выявления зон фокальной кортикальной дисплазии, для улучшения дооперационной диагностики и оптимизации тактики хирургического лечения.

На основании использования программ ANTs и FSL был разработан алгоритм МР-морфометрии. С его помощью были сгенерированы карты z-показателя размытия перехода серого и белого вещества и толщины коры (Junction and thickness maps).

Создан алгоритм автоматического обнаружения зон фокальной кортикальной дисплазии, на котором яркие участки мозга на z-картах являются признаками ФКД (утолщение коры и нарушение перехода серого и белого вещества). Таким образом, метод МР-морфометрии является перспективной методикой для дополнительной оценки патологических изменений при фокальной кортикальной дисплазии.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, магнитно-резонансная морфометрия, фокальная кортикальная дисплазия, толщина коры, размытие серого-белого вещества.

* **Шевченко Александр Михайлович**, аспирант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (925) 488-83-60. Электронная почта: shevchenko@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4779-2370

Shevchenko Alexander Mikhailovich, postgraduate student of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (925) 488-83-60. E-mail: shevchenko@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4779-2370

© А. М. Шевченко, Э. Л. Погосбекян, А. И. Баталов, Е. И. Шульц, А. Н. Тюрина, Л. М. Фадеева, М. В. Шевченко, П. А. Власов, Н. Е. Захарова, А. Г. Меликян, И. Н. Пронин.

Финансирование исследования и конфликт интересов

Исследование не финансировалось какими-либо источниками. Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов. Мнения, изложенные в статье, принадлежат авторам рукописи. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

MEDICAL TECHNOLOGY

Scientific article.

Automatic Algorithm of Magnetic Resonance Morphometry in the Diagnosis of Focal Cortical Dysplasia

A. M. Shevchenko*, E. L. Pogosbekyan, A. I. Batalov, E. I. Shultz, A. N. Tyurina, L. M. Fadeeva, M. V. Shevchenko, P. A. Vlasov, N. E. Zakharova, A. G. Melikyan, I. N. Pronin

N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia

Abstract

The purpose of the study — to create an original algorithm of MR-morphometry for identifying FCD zones. Based on the use of the ANTs and FSL programs, an algorithm for MR morphometry was developed. It was used to generate maps of the z-index of the blur of the transition of gray and white matter and the thickness of the crust (Junction and thickness maps).

An algorithm for automatic detection of focal cortical dysplasia zones has been developed. The MRI morphometry method is a promising technique for additional assessment of pathological changes in focal cortical dysplasia.

Key words: Magnetic Resonance Imaging, Magnetic Resonance Morphometry, Focal Cortical Dysplasia, Cortical Thickness, Gray-White Matter Blur.

Research funding and conflict of interest

The study was not funded by any sources. The authors state that this work, its topic, subject and content do not affect competing interests. The opinions expressed in the article belong to the authors of the manuscript. The authors confirm the compliance of their authorship with the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, the preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Актуальность

МР-морфометрия структур головного мозга получила широкое распространение в связи с внедрением в клиническую практику воксельного анализа данных

(VBM-voxel-based morphometry) [1] при исследовании таких заболеваний, как фокальная кортикальная дисплазия (ФКД), болезнь Альцгеймера, шизофрения [7]. Анализ изображений этим методом основывается на постобработке 3D-MP-изображений, выполненных с изотропным вокселем. При MP-морфометрии большое значение отводится постобработке данных с помощью специальных математических пакетов и приложений для персонального компьютера. С помощью таких программ производится дополнительный анализ структур головного мозга в попытке избежать «субъективизма» врача-нейрорентгенолога при визуальном способе оценки структур головного мозга. Существует множество разновидностей таких программных приложений со своими положительными и отрицательными характеристиками [6, 10]. Главной задачей исследования стала разработка оригинального алгоритма морфометрии, способного выявлять признаки ФКД, такие как утолщение коры и нарушение перехода серого и белого

вещества, с целью дооперационной оценки зон ФКД и улучшения планирования тактики хирургического лечения.

Материалы и методы

С целью разработки оригинального алгоритма MP-морфометрии было исследовано 15 здоровых добровольцев в возрасте от 19 до 54 лет (средний возраст 37 лет). На основе стандартного протокола МРТ с добавлением последовательности FSPGR было исследовано 10 пациентов в возрасте от 2 до 16 лет (средний возраст 8 лет) с ФКД II типа.

У 7 пациентов ФКД локализовалась в лобной и по одному случаю с локализацией в теменной, височной и затылочной долях (табл.).

Всем пациентам выполнен видео-ЭЭГ-мониторинг. При этом у трех пациентов начало приступа достоверно не удалось установить.

1. Получение исходных данных МРТ

В ходе разработки алгоритма морфометрии начальная постобработка дан-

Клинические данные десяти пациентов с подтвержденной фокальной кортикальной дисплазией

№	Возраст/ пол	Зона хирургической резекции (доля мозга)	Тип ФКД	Трансмантий- ный тяж	Исход по ENGELE
1	13/ж	левая лобная	IIВ	+	IA
2	4/ж	правая лобная	IIВ	—	IV
3	16/ж	правая лобная	IIВ	+	IID
4	9/м	левая теменная	IIВ	+	IIA
5	10/ж	левая лобная	IIВ	—	—
6	5/ж	правая затылочная	IIA	+	—
7	16/м	правая височная	IIВ	+	—
8	9/ж	правая лобная	IIВ	+	—
9	2/ж	левая лобная	IIВ	+	IA
10	4/м	левая лобная	IIВ	—	—

ных МРТ была выполнена в программе ANTs. Последующие элементарные преобразования изображений (такие, как вычитание из одного изображения другого, бинаризация, сглаживание, создание двоичной маски) были выполнены в программах ANTs и FSL [6, 8]. Для исследования применяли FSPGR с изотропным вокселем $1 \times 1 \times 1$ мм³.

Расчет морфометрических карт включал следующие шаги: постобработку МРТ, вычисление параметрических карт зон перехода серого-белого вещества, расчет толщины коры, автоматический поиск зон ФКД.

2.1. Постобработка МРТ

Постобработка МРТ-изображений выполнялась автоматически с помощью скрипта `antsCorticalThickness.sh` из программного пакета ANTs. Сначала проводились нормализация и коррекция интенсивности МР-сигнала структур мозга (шаг 1). Далее этот скрипт вычислял параметрическую карту, где интенсивность вокселя равна толщине коры (в миллиметрах) в выбранном месте. Помимо параметрической карты толщины коры, данный скрипт генерировал множество вспомогательных файлов, среди которых бинарная маска мозга, бинарные и вероятностные карты сегментации на серое, белое вещество и спинномозговую жидкость (шаг 2). Для работы скрипта `antsCorticalThickness.sh` использовалось FSPGR, а также вспомогательные файлы: шаблон с усредненным изображением мозга здоровых добровольцев и вероятностные карты, определяющие на шаблоне маску мозга, серое/белое вещество и т. п. Вспомогательные файлы были взяты из файловой системы MICCAI2012-Multi-Atlas-Challenge-Data. Усредненный шаблон был получен на основе FSPGR у

25 здоровых добровольцев. Вероятностные карты этой файловой системы были рассчитаны после ручной разметки каждого из изображений.

Часто скрипт `antsCorticalThickness.sh` генерировал некорректные результаты из-за того, что относительная толщина костей черепа у детей и у взрослых сильно различается (отношение толщины черепа в переднезаднем направлении к размеру мозга). В представленной работе МРТ детей сопоставлялись с усредненным шаблоном МРТ взрослых путем аффинных и нелинейных трансформаций входного изображения, для определения границы мозга на FSPGR.

На одном из первых этапов скрипт `antsCorticalThickness.sh` вычисляет маску мозга пациента и в дальнейшем работает с FSPGR, на котором удалены кости черепа и субарахноидальные пространства. Во всех случаях, когда `antsCorticalThickness.sh` давал ошибочные результаты, маска мозга вычислялась некорректно. Исправление маски на начальном этапе работы `antsCorticalThickness.sh` позволило на последующих этапах получить корректные результаты с параметрическими картами толщины коры и сегментации на серое и белое вещество.

Скрипт `antsCorticalThickness.sh` выполняет коррекцию неоднородности магнитного поля на FSPGR исследуемого. Все математические операции по FSPGR, которые далее будут описаны в тексте, выполнялись на МРТ с коррекцией неоднородности магнитного поля, а также с удалением внемозговых структур.

2.2. Вычисление параметрических карт зон перехода серого-белого вещества

Используя результаты сегментации на серое и белое вещество, для каждо-

го здорового добровольца и больного с ФКД мы вычислили индивидуальные пограничные значения интенсивности МР-сигнала по FSPGR, которые были рассчитаны по формуле:

$$GM_mean + 0,5 \times GM_sd$$

$$\text{и } WM_mean - 0,5 \times WM_sd,$$

где GM_mean — среднее значение интенсивности сигнала на T1-ВИ в сером веществе здоровых добровольцев и больных с ФКД, GM_sd — стандартное отклонение интенсивности сигнала на FSPGR в сером веществе здоровых добровольцев и больных с ФКД, WM_mean — среднее значение интенсивности сигнала на FSPGR в белом веществе здоровых добровольцев и больных с ФКД, WM_sd — стандартное отклонение интенсивности сигнала на FSPGR в белом веществе здоровых добровольцев и больных с ФКД (шаг 3).

Чтобы найти участки переходов из серого в белое вещество, на анализируемом FSPGR всем вокселям вне области коры мозга, а также всем вокселям, интенсивность которых не попадала в интервал пограничных значений, было присвоено нулевое значение интенсивности. Полученное изображение бинаризовали, т. е. всем ненулевым вокселям было присвоено значение интенсивности, равное единице. Затем изображение сгладили с помощью функции трехмерной свертки с ядром $5 \times 5 \times 5$ вокселей (шаг 4).

Сравнение с контрольной группой (шаг 5). Чтобы компенсировать вариативность толщины зон переходов серого-белого вещества в разных областях мозга, полученное сглаженное изображение сравнивали с контрольной группой здоровых добровольцев, обследо-

ванных на том же магнитно-резонансном томографе (МРТ), как и для пациентов с патологией. Следует отметить, что на этом шаге использовались данные центра нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко, а не файловая система MICCAI2012-Multi-Atlas-Challenge-Data, данные которой использовались на предыдущем этапе. Использование файловой системы MICCAI2012-Multi-Atlas-Challenge-Data на шаге 5 было невозможно из-за того, что изображения были получены на других томографах и с другими настройками сканирования.

Набор данных и их обработка для контрольной группы проводилась так же, как описано в шагах 1–4. Затем по FSPGR здоровых добровольцев с удаленными внемозговыми структурами был реконструирован усредненный шаблон. Это построение выполнялось с помощью скрипта `antsMultivariateTemplateConstruction.sh` из программного пакета ANTs. Все сглаженные изображения переходов серое-белое вещество у здоровых добровольцев с помощью аффинных и нелинейных преобразований были переведены в пространство полученного шаблона, по ним затем было вычислено усредненное изображение юкстакортикальной области.

Расчет карты z-показателя (шаг 6). По сглаженным изображениям переходов серое-белое вещество была рассчитана параметрическая карта, где интенсивность в каждом вокселе с индексом $[i, j, k]$ равна стандартному отклонению по вокселям с такими же индексами $[i, j, k]$ для группы здоровых добровольцев. На заключительном этапе из сглаженного изображения переходов серое-белое вещество исследуемого пациента вычитается аналогичное усредненное изображение группы здоровых добровольцев,

а затем делится на параметрическую карту стандартных отклонений сглаженных изображений группы здоровых добровольцев. Чтобы снизить влияние ошибок корегистрации на границе анатомии, карта стандартных отклонений предварительно сглаживалась с помощью гауссового фильтра с ядром $6 \times 6 \times 6$ мм. Яркие участки в полученном изображении соответствуют областям с менее четкой границей между серым и белым веществом, а также с более широкой переходной зоной по сравнению с контрольной группой.

Тем не менее оказалось, что подкорковые структуры и перивентрикулярные области могут иметь повышенную яркость на карте z-показателя, если интенсивность их сигнала попадает в диапазон значений интенсивностей, рассчитанных на шаге 2.1, и отличается от величин, полученных в группе здоровых добровольцев. Эти изменения представлены на рис. 1.

2.3. Расчет толщины коры

С помощью скрипта `antsCorticalThickness.sh` для каждого испытуемого была вычислена параметрическая карта толщины коры. Как и на этапе 2.1, все параметрические карты были переведены в пространство усредненного шаблона изображений здоровых добровольцев (шаг 7).

Далее проводилось сравнение с контрольной группой здоровых добровольцев. Для компенсации изменчивости толщины коры в разных областях мозга выполнялись те же математические операции, что и при вычислении z-оценки параметрических карт зон переходов серое-белое вещество: из карты толщины коры исследуемого пациента вычитали карту средних значений тол-

щины коры в группе здоровых добровольцев (шаг 8). Получившееся изображение делили на карту стандартных отклонений толщины коры по группе здоровых добровольцев, которую предварительно сгладили гауссовым фильтром с ядром $6 \times 6 \times 6$ мм (шаг 9).

На усредненном изображении контрольной группы всем вокселям с нулевыми значениями (т. е. где ни один из вокселей здоровых добровольцев контрольной группы не имеет серого вещества) было присвоено значение, равное средней интенсивности ненулевых вокселей. Таким образом, любая аномалия толщины коры может оцениваться в участках, где есть отклонение от данных контрольной группы. В противном случае необычно глубокие борозды очень сильно отличались бы от данных контрольной группы, даже если толщина коры была

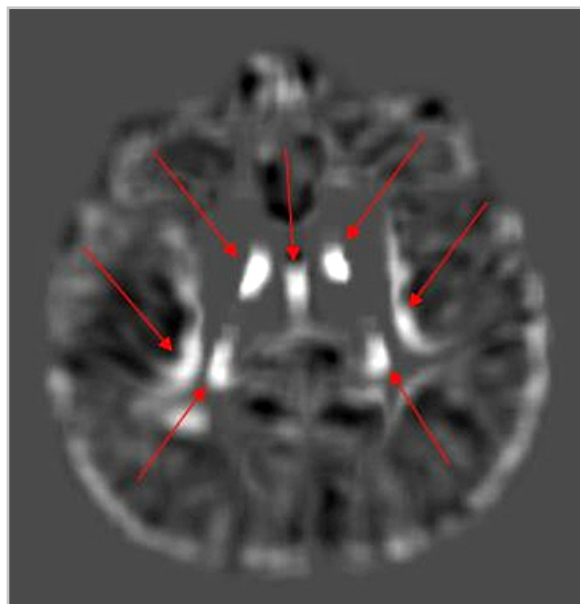


Рис. 1. Изображение соединения на основе FSPGR, z-показатель перехода серого и белого вещества. Зоны аномальной повышенной яркости в перивентрикулярных областях, не являющиеся областями фокальной кортикальной дисплазии (стрелки)

нормальной в этой локализации. На полученном изображении z-оценки яркие зоны определяли области с аномально увеличенной толщиной коры.

3. Автоматический поиск зон ФКД

Зоны ФКД можно автоматически оконтурить по z-картам толщины коры и переходов серое-белое вещество. Для этого нами был написан скрипт на Matlab, который выделяет аномально яркие связанные области на параметрических картах. Яркость таких областей определяли как выбросы в распределении интенсивностей вокселей изображения. Используя формулу Тьюки, мы определили нижнюю границу яркости аномальных вокселей:

$$I = Q_3 + k (Q_3 - Q_1),$$

где k — это параметрический коэффициент, который по умолчанию равен 1,5, Q_1 — первый квартиль, а Q_3 — третий квартиль.

Из формулы видно, что чем выше значение параметра k , тем меньшее количество и объем областей выделяет программа. На z-картах, построенных по T1-ВИ здоровых добровольцев, также присутствовали аномально яркие связанные области, определенные с использованием формулы Тьюки. Единственное отличие таких областей от зон ФКД у пациентов — их объемы существенно меньше объемов зон ФКД. При применении значений ниже пороговых будут выявляться множественные яркие участки на z-картах у здоровых добровольцев, которые распределены по всему изображению объема мозга. У пациентов с ФКД, как правило, выявляется один наиболее крупный яркий участок выше пороговых значений и множество мелких ярких

участков, которые будут распределены по всему изображению объема мозга. Поэтому мы решили использовать второй параметр в скрипте для Matlab — пороговый объем: программа оконтуривала только те яркие области z-карт, у которых объем был больше 50 мм³. В наших последующих работах мы постараемся подобрать оптимальные значения параметра k и минимального объема зон ФКД, чтобы чувствительность и специфичность автоматической разметки по z-картам были максимальными. Полученные z-показатели можно совмещать с анатомическими структурными FSPGR головного мозга, чтобы определить конкретную локализацию ФКД (рис. 3). Эта операция проводилась в программе Mango, при этом можно использовать любую цветовую гамму.

Результаты и их обсуждение

В ходе исследования разработан автоматический алгоритм, который позволяет оценить признаки ФКД по двум признакам: размытие перехода серого и белого вещества и утолщения коры с помощью использования программ ANTs и FSL (рис. 2).

Алгоритм дает возможность измерения толщины коры в миллиметрах путем измерения кратчайшего расстояния от центральной точки коры до белого вещества либо до субарахноидальных пространств.

После создания алгоритма морфометрии были проанализированы МРТ-данные 10 здоровых добровольцев. При этом визуальная оценка показала, что аномально ярких зон, которые бы могли говорить о признаках ФКД, не было выявлено.

У всех 10 пациентов с ФКД по данным морфометрии были выявлены ано-

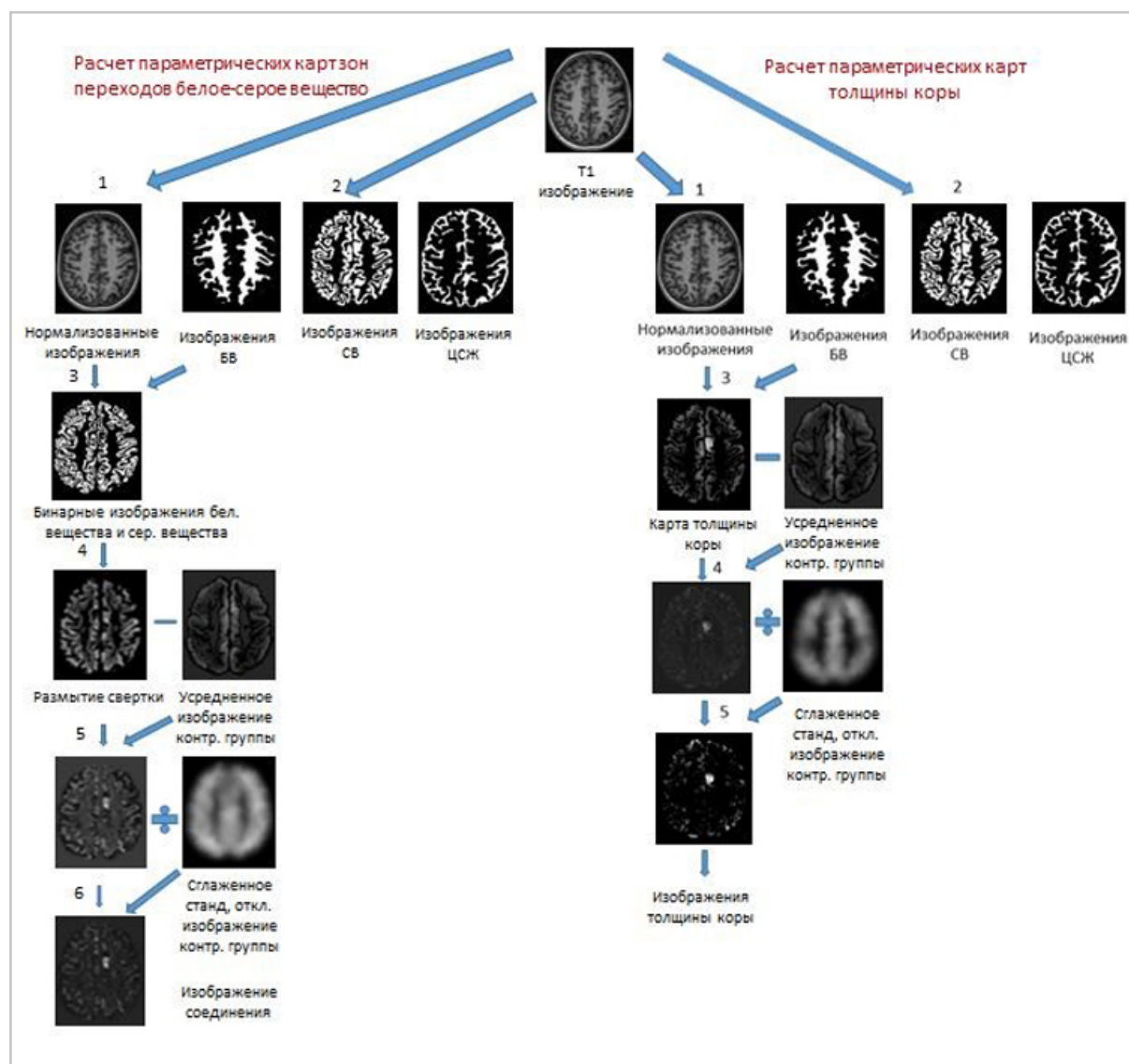


Рис. 2. Этапы обработки изображений, необходимых для расчета морфометрических изображений. Предварительная обработка: 1 — нормализация и коррекция интенсивности, 2 — сегментация. Вычисление параметрических карт зон переходов серое-белое вещество: 3 — фильтрация и преобразование в двоичное изображение; содержащее воксели интерфейса серое вещество — белое вещество; 4 — свертка; 5 — сравнение с контрольной группой; 6 — расчет карты z-показателя. Расчет толщины коры: 3 — построение параметрической карты толщины коры; 4 — сравнение с контрольной группой; 5 — расчет карты z-показателя

мально яркие области на z-картах по признаку утолщения коры и нарушения перехода серого и белого веществ (рис. 3).

После хирургического лечения сопоставлены зоны резекции и anomalно

яркие зоны МР-морфометрии, на которых зоны резекции полностью совпали с anomalно яркими зонами. У трех пациентов, у которых на видео-ЭЭГ-мониторинге не удалось локализовать начало приступа, на z-карте выявля-

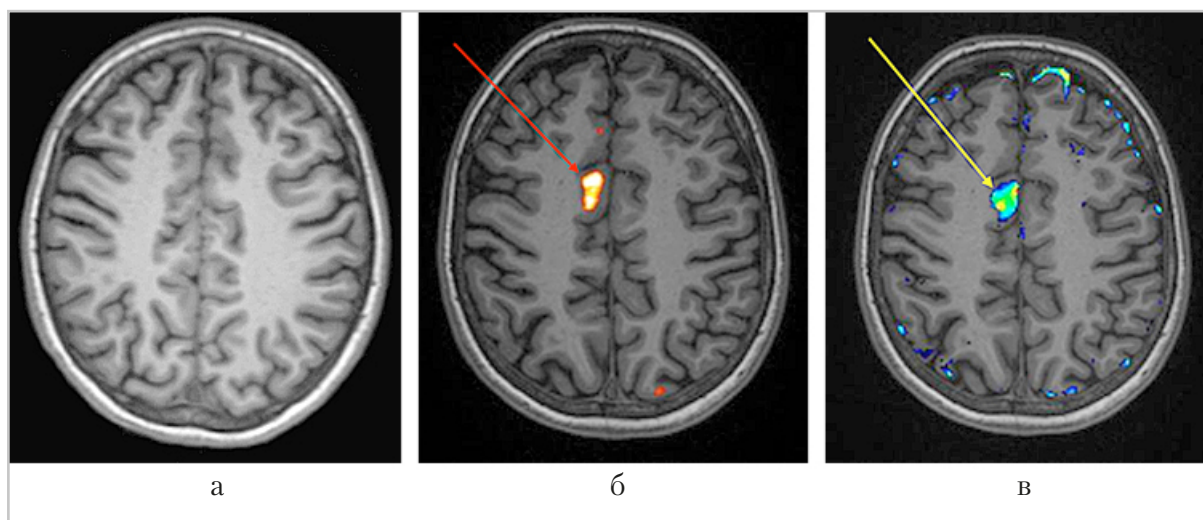


Рис. 3. МРТ пациентки 12 лет с ФКД II в режиме FSPGR. На МР-томограммах в режиме FSPGR (а) явных участков утолщения коры либо нарушения границы перехода серого и белого вещества не отмечается. При совмещении FSPGR с z-картами визуализируется участок (красная стрелка) нарушения границы перехода серого и белого (б) и участок (желтая стрелка) утолщения коры (в) в левой лобной доле, не определяемые на нативном изображении

ли аномально яркие участки по обоим признакам ФКД.

МР-морфометрия является перспективной технологией визуализации неочевидных зон ФКД. Особенно это важно в диагностике ФКД I типа, при которой, как правило, нет четкой границы аномалии, что затрудняет визуальную оценку МРТ у таких пациентов. При этом исход лечения напрямую зависит от радикальности удаления ФКД. С целью улучшения верификации ФКД разработан алгоритм автоматического обнаружения дисплазии на основе интенсивности сигнала карт z-показателя утолщения коры и нарушения границы перехода серого и белого вещества. В исследовании Seok-Jun Hong et al. (2014) [9] были представлены результаты применения автоматической МР-морфометрии в диагностике ФКД II типа с разработанным оригинальным алгоритмом МР-

морфометрии с чувствительностью 74 % и специфичностью 100 %. Основываясь на анализе вышеописанного исследования и многих других, мы пытались оптимизировать автоматический алгоритм МР-морфометрии и подобрать наиболее оптимальные пороговые значения для получения высокой чувствительности и специфичности поиска зон ФКД. В литературе упомянуто несколько видов программ, с помощью которых проводится морфометрия. В исследовании Bo Jin et al. (2018) [2] на этапах сегментации и создания маски применялась программа FreeSurfer [3], обработка данных на которой занимает от 20 до 40 ч в зависимости от мощности персонального компьютера. В проведенном исследовании авторами разработан алгоритм с использованием комбинации программ ANTs и FSL длительностью от 1,5 до 2 ч для выполнения всех этапов морфометрии (от нормализации изображе-

ний до получения z-карт). Хорошо известно, что существуют определенные трудности применения МР-морфометрии. Исходные FSPGR изображения должны быть хорошего качества и без каких-либо артефактов. Последние являются основной причиной некорректной морфометрии. В нашей работе использован FSPGR с изотропным вокселем $1 \times 1 \times 1$ мм³, хотя при визуальной оценке МР-изображений нарушение границ перехода серого и белого вещества более отчетливо видно на T2-ВИ и T2-FLAIR. Так, Cuixia Feng et al. [4] применили МР-морфометрический анализ на основе T2-FLAIR в проведении морфометрии, однако малая выборка пациентов не позволяет сделать определенных выводов. Дальнейшее исследование оптимальных импульсных последовательностей для проведения МР-морфометрии может улучшить диагностическую значимость методики. При создании алгоритма морфометрии мы столкнулись с рядом трудностей. Первая заключалась в том, что на этапе построения маски мозга у пациентов особенно раннего возраста, до 10 лет, некорректно генерировалась маска мозга, так как кости черепа детей намного тоньше костей взрослого человека. В таких случаях мы создавали маску мозга вручную, которую впоследствии совмещали с маской черепа взрослого здорового добровольца. Вторая проблема заключалась в том, что у некоторых пациентов крупные артерии в головном мозге, которые выглядели на FSPGR как яркие области, вносили определенную погрешность в работу скрипта `antsCorticalThickness.sh`. Для удаления артерий использованы дополнительные изображения, полученные с использованием импульсной последовательности

SWAN [5], на которых артерии выглядят сильно ярче окружающих их тканей. Яркие области исключались, используя выбранное нами пороговое значение интенсивности сигнала. Также корректную работу `antsCorticalThickness.sh` нарушал аномально яркий МР-сигнал областей подкорковых структур, перивентрикулярных областей или оставшиеся на изображении фрагменты костей черепа. Их исключение делалось благодаря применению порогового значения интенсивности по FSPGR (рис. 1).

Выводы

МР-морфометрия является перспективной технологией дополнительной оценки зон ФКД.

Созданный нами автоматический алгоритм МР-морфометрии характеризуется приемлемым временем для реконструкции и продемонстрировал свою диагностическую информативность при использовании на группе десяти пациентов с ФКД.

Продолженные исследования позволяют определить клиническую значимость нового метода.

Список литературы / References

1. Ananth H., Popescu I., Critchley H. D., Good C. D., Frackowiak R. S., Dolan R. J. Cortical and subcortical gray matter abnormalities in schizophrenia determined through structural magnetic resonance imaging with optimized volumetric voxel-based morphometry. *Am. J. Psychiatry*. 2002. V. 159. P. 1497–1505.
2. Jin B., Krishnan B., Adler S., Wagstyl K., Hu W., Jones S., Najm I., Alexopoulos A., Zhang K., Zhang J., Ding M., Wang S. Automated detection of focal cortical dysplasia type II with surface-based magnetic resonance imaging postprocessing and machine

- learning. *Epilepsia*. 2018. V. 59. No. 5. P. 982–992.
3. *Fischl B.* FreeSurfer. *Neuroimage*. 2012. V. 62. No. 2. P. 774–81.
4. *Feng C., Zhao H., Li Y., Wen J.J.* Automatic localization and segmentation of focal cortical dysplasia in FLAIR-negative patients using a convolutional neural network. *Appl Clin Med Phys*. 2020. V. 21. No. 9. P. 215–226.
5. *Haacke E. M., Mittal S., Neelavalli Z. Wu.* Susceptibility-Weighted Imaging: Technical Aspects and Clinical Applications // *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 2009. V. 30. № 1. P. 19–30.
6. *Jenkinson M., Beckmann C.F., Behrens T. E. J., Woolrich M. W., Smith S. M.* FSL. *NeuroImage*. 2012. V. 62. No. 2. P. 782–790.
7. *Matsuda H.* MRI morphometry in Alzheimer's disease. *Ageing Res Rev*. 2016. V. 30. P. 17–24.
8. *Tustison N.J., Holbrook A.J., Avants B. B., Roberts J. M., Cook P. A., Reagh Z. M., Duda J. T., Stone J. R., Gillen D. L., Yassa M. A.* The ANTs Longitudinal Cortical Thickness Pipeline View for the Alzheimer's Disease. *J. Alzheimers Dis*. 2019. V. 71. No. 1. P. 165–183.
9. *Hong S., Kim H., Schrader D., Bernasconi N., Bernhardt B. C., Bernasconi A.* Automated detection of cortical dysplasia type II in MRI-negative epilepsy. *Neurology*. 2014. V. 83. No. 1. P. 48–55.
10. *Chen X., Qian T., Marchal B., Zhang G., Yu T., Ren Zh., Ni D., Liu C., Fu Y., Chen N., Li K.* Quantitative volume-based morphometry in focal cortical dysplasia: A pilot study for lesion localization at the individual level. *European J. of Radiology*. 2018. V. 105. P. 240–245.

Сведения об авторах

Шевченко Александр Михайлович, аспирант отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (925) 488-83-60. Электронная почта: shevchenko@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4779-2370

Вклад автора: разработка концепции — формирование идеи, цели и ключевых задач.

Shevchenko Alexander Mikhailovich, postgraduate student of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (925) 488-83-60. E-mail: shevchenko@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4779-2370

Author contributions: concept development is the formation of an idea, a goal and key tasks.

Погосбекян Эдуард Леонидович, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (985) 246-43-68. Электронная почта: epogosebkyan@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4803-6948

Вклад автора: разработка методологии — разработка и дизайн методологии.

Pogosebkyan Eduard Leonidovich, medical physicist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (925) 488-83-60. E-mail: epogosebkyan@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4803-6948

Author contributions: methodology development — methodology development and design.

Баталов Артем Игоревич, научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (916) 066-20-50. Электронная почта: abatalov@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-8924-7346

Вклад автора: проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Batalov Artem Igorevich, researcher of physicist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (916) 066-20-50. E-mail: abatalov@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-8924-7346

Author contributions: research — analysis and interpretation of the data obtained.

Шульц Евгений Игоревич, кандидат медицинских наук, врач-рентгенолог отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, 4-я Тверская-Ямская улица, д. 16.

Тел.: +7 (916) 607-36-95. Электронная почта: eshults@nsi.ru

ORCID.org/0000-0001-5406-944X

Вклад автора: проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Shults Evgenij Igorevich, Ph. D. Med., Radiologist, Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (916) 607-36-95. E-mail: eshults@nsi.ru

ORCID.org/0000-0001-5406-944X

Author contributions: research — analysis and interpretation of the data obtained.

Тюрина Анастасия Николаевна, младший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (916) 634-25-22. Электронная почта: aturina@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-2333-7867

Вклад автора: проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Tyurina Anastasiya Nikolaevna, Junior Researcher of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (916) 634-25-22. E-mail: aturina@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-2333-7867

Author contributions: research — analysis and interpretation of the data obtained.

Фадеева Людмила Михайловна, ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (917) 595-30-93. Электронная почта: lmf@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-3240-5585

Вклад автора: разработка методологии — разработка и дизайн методологии.

Fadeeva Liudmila Mikhailovna, Leading Engineer of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (917) 595-30-93. E-mail: lmf@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-3240-5585

Author contributions: methodology development — methodology development and design.

Шевченко Мария Владимировна, ординатор отделения функциональной диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 12504, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (968) 896-84-09. Электронная почта: maria_iii@mail.ru

ORCID.org/0000-0002-6884-4520

Вклад автора: проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Shevchenko Maria Vladimirovna, resident of the Department of Functional Diagnostics, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (968) 896-84-09. E-mail: maria_iii@mail.ru

ORCID.org/0000-0002-6884-4520

Author contributions: research — analysis and interpretation of the data obtained.

Власов Павел Александрович, доктор второго нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (926) 586-47-23. Электронная почта: pvlasov@nsi.ru

ORCID.org/0000-0003-2381-8609

Вклад автора: проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Vlasov Pavel Alexandrovich, Doctor of the Second Neurosurgical Department, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (926) 586-47-23. E-mail: pvlasov@nsi.ru

ORCID.org/0000-0003-2381-8609

Author contributions: research — analysis and interpretation of the data obtained.

Захарова Наталья Евгеньевна, доктор медицинских наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (499) 972-85-55. Электронная почта: nzakharova@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-0516-3613

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Zakharova Natalia Evgen'evna, M. D. Med., Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Research Fellow, Neurosurgical Department, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (499) 972-85-55. E-mail: nzakharova@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-0516-3613

Author contribution: approval of the final version of the publication — taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Меликян Арменак Григорьевич, доктор медицинских наук, профессор, заведующий вторым нейрохирургическим отделением ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.

Тел.: +7 (499) 972-85-55. Электронная почта: Melikian@nsi.ru

ORCID.org/0000-0003-0737-5983

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Melikyan Armenak Grigorievich, M. D. Med., Professor, Head of the Second Neurosurgical Department, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (499) 972-85-55. E-mail: Melikian@nsi.ru

ORCID.org/0000-0003-0737-5983

Author contributions: approval of the final version of the publication — taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Пронин Игорь Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. академика Н. Н. Бурденко» Минздрава России.

Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д.16.

Тел.: +7 (499) 972-85-55. Электронная почта: Pronin@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4480-0275

Вклад автора: утверждение окончательного варианта публикации — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Pronin Igor` Nikolaevich, M. D. Med., Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.

Phone number: +7 (499) 972-85-55. E-mail: Pronin@nsi.ru

ORCID.org/0000-0002-4480-0275

Author contributions: approval of the final version of the publication — taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Дата поступления статьи в редакцию издания: 26.11.2021 г.

Дата одобрения после рецензирования: 23.12.2021 г.

Дата принятия статьи к публикации: 23.12.2021 г.