



Талабаев М.В.✉, Соловьева А.Ю., Апанович М.А.

Республиканский научно-практический центр неврологии и нейрохирургии,
Минск, Беларусь

Роль диффузно-тензорной трактографии, интегрированной в навигационную станцию, в прогнозировании развития нового неврологического дефицита у детей с новообразованиями двигательных отделов коры головного мозга

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: концепция и дизайн исследования, обработка материала, написание текста – Талабаев М.В.; сбор графического материала, обработка материала – Соловьева А.Ю.; сбор, обработка материала – Апанович М.А.

Подана: 19.05.2023

Принята: 21.06.2023

Контакты: talabaevm@inbox.ru

Резюме

Важнейшим и приоритетным направлением современной нейрохирургии является сохранение качества жизни пациента, данного параметра позволяет достичь использование современных навигационных устройств и интегрирование программных обеспечений с целью не только планирования нейрохирургического вмешательства, но и интраоперационной нейронавигации. В нашем исследовании мы изучили особенности использования диффузно-тензорной трактографии, интегрированной в навигационную систему, для лечения новообразований функционально значимых отделов коры головного мозга у детей.

Ключевые слова: функционально значимые отделы коры головного мозга, функциональная магнитно-резонансная томография, диффузно-тензорная трактография, диффузно-тензорные изображения, опухоли головного мозга



Talabaev M., Salauyeva H., Apanovich M.

Republican Research and Clinical Center of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus

The Role of Diffuse Tensor Tractography Integrated into the Navigation System in Predicting the Development of a New Neurological Deficit in Children with of the Motor Cortex Tumors

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: concept and design of research, processing of material, writing of the text – Talabaev M.; collection of graphic material, processing of material – Salauyeva H.; collection, processing of material – Apanovich M.

Submitted: 19.05.2023

Accepted: 21.06.2023

Contacts: talabaevm@inbox.ru

Abstract

The most important and priority direction of modern neurosurgery is the preservation of the patient's quality of life, ensuring this category allows the use of navigation devices and integrated software to achieve not only the planning of neurosurgical intervention, but also intraoperative neuronavigation. In our study, we studied the features of using diffuse tensor tractography integrated into the navigation system for the treatment of eloquent brain area tumors in children.

Keywords: eloquent areas of the cerebral cortex, functional magnetic resonance imaging, diffuse tensor tractography, diffusion tensor imaging, brain tumors

■ ВВЕДЕНИЕ

Функциональные магнитно-резонансные изображения (МРТ), такие как функциональная МРТ (фМРТ) и МРТ диффузно-тензорная трактография (МРТ ДТТ, МРТ-трактография), в последние годы стали использоваться в нейрохирургии с главной целью сохранения функции. Соответствие между структурой и функцией даже в здоровом мозге может значительно различаться, что усугубляется при наличии искаженной анатомии мозга [1, 2]. Применение фМРТ в детской практике имеет ограниченный характер, главным образом из-за меньшей способности детей лежать неподвижно необходимое время, соблюдать инструкции и выполнять парадигмы, что может ухудшать качество оказания нейрохирургической помощи детям [3, 4]. МРТ-трактография – методика, не требующая нахождения обследуемого в сознании, а значит, может быть выполнена пациентам любого возраста, в том числе нуждающимся в седации или наркозе во время исследования. МРТ-трактография предоставляет индивидуальную анатомию проводящих путей белого вещества [5, 6], однако методика до настоящего времени не является рутинной процедурой в предоперационном планировании, ее возможности и преимущества изучаются [18–21].

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка влияния предоперационной МРТ-трактографии, интегрированной в навигационную систему, на нейрохирургическую помощь детям с новообразованиями функционально значимых отделов коры головного мозга.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проведено ретро-проспективное исследование, включающее 40 пациентов детского возраста с новообразованиями, расположенными в проекции первичной и дополнительной двигательной коры головного мозга, у которых предоперационное обследование и планирование осуществлялось с использованием данных МРТ-трактографии, интегрированной в навигационную систему. Все пациенты проходили обследование и нейрохирургическое лечение в РНПЦ неврологии и нейрохирургии в 2016–2022 гг. Возраст пациентов составлял от 0,69 до 18,03 года. Медиана возраста – 10,48 года. Среди пациентов 21 (52,5%) мальчик, 19 (47,5%) девочек.

Оценка неврологического статуса проводилась перед операцией, сразу после, через один и через 6 месяцев после вмешательства. Данные структурной МРТ и МРТ-трактографии (ДВИ) записывались на DVD-диск и переносились в навигационную станцию, где проводились построение кортикоспинальных трактов и их анализ. Затем в каждом случае измерялось кратчайшее расстояние от опухоли до кортикоспинальных трактов в одной из трех проекций, кроме того, с помощью МРТ-трактографии изучалось расположение прецентральной извилины. Границу опухоли определяли в T2 или T2 FLAIR изображениях при низкоконтрастных опухолях и кавернозных мальформациях или по границе накопления контрастного вещества в T1 изотропных изображениях или T2 FLAIR изображениях при высококонтрастных опухолях.

Исследования выполнялись на основе использования сверхпроводящего магнита с напряженностью поля 3,0 Тесла Discovery MP750w 3.0T фирмы General Electric и магнита с напряженностью поля 1,5 Тесла Optima MR450w фирмы General Electric. В протокол исследования структурной МРТ головного мозга входили следующие последовательности: T1(Ax FSPGR 3D), Ax T2 PROPELLER, Ax SWAN, Ax DTI (6 Direction), Ax T2 FLAIR, Cor T2 PROPELLER, 3D 3 SLAB ASSET TOF, T1(Ax FSPGR 3D) + contrast. Сканирование DTI, а также изображения ADC были реконструированы вместе с цветными картами FA. Значения FA и ADC выбранных областей интереса (ROI) были измерены и сравнены.

При построении МРТ-трактографии на навигационной станции использовались различные отделы головного мозга в зависимости от локализации и распространенности новообразования. Это могли быть внутренняя капсула (коллено и заднее бедро) или ножки среднего мозга. Для резекции опухоли использовалась микрохирургическая техника «субпиального» удаления в пределах функциональных границ.

Статистический анализ

Для оценки различий между двумя независимыми выборками использовался U-критерий Манна – Уитни. Вероятность наступления события определялась с помощью метода бинарной логистической регрессии. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.



Описание метода

Метод МРТ-трактографии используется в отечественной нейрохирургии уже около 10 лет. Выполнив построение трактограмм на станции МРТ, нейрохирург может проводить предоперационное планирование, получая информацию о пространственном расположении патологического процесса и изучаемых проводящих путей белого вещества, чаще всего это кортикоспинальные тракты. Однако это не позволяло определять место «выхода» проводящих путей на кору мозга, а также проводить измерение необходимых расстояний. МРТ-трактография, интегрированная в навигационную станцию, является новейшей диагностической технологией, ее применение дает дополнительную информацию о расположении трактов (рис. 1).

Говоря о новообразованиях, расположенных в проекции первичной и дополнительной моторной коры головного мозга, необходимо осознавать, что часть из них деформируют поверхность коры головного мозга и делают практически невозможной идентификацию прецентральной извилины и такой важной ее части, как «точка руки» или точка «омега», названной так в связи с ее схожестью с греческой буквой «омега» (Ω) на структурных снимках (рис. 2).

Важность точного определения «точки руки» связана с тем, что считается, что в этой части прецентральной извилины проходит более 50% кортикоспинальных трактов, в том числе имеющих отношение к движению руки [20–22]. Задачами исследования были изучение возможности определять расположение коры прецентральной

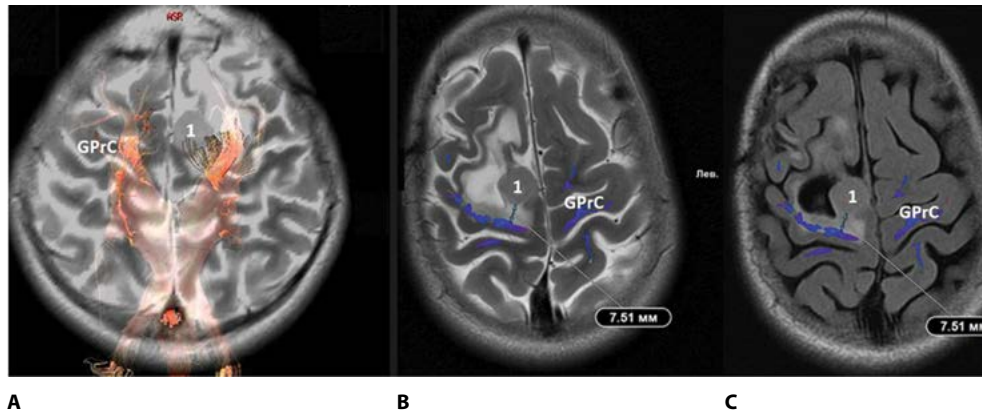


Рис. 1. А – Т2 изображения, совмещенные с МРТ-трактографией (оранжевый цвет) на станции МРТ. Видны опухоль (1) и ориентировочное расположение кортикоспинальных трактов. В, С – результаты этого же МРТ-исследования (Т2 и Т1 изображения) на навигационной станции, интегрированной с МРТ-трактографией. Опухоль (1), синим цветом выделены кортикоспинальные тракты, «начинающиеся» на коре прецентральной извилины (GPrC), а также измеренное расстояние от опухоли до кортикоспинальных трактов
Fig. 1. А – Т2 image with MRI-tractography (orange color) at the MRI station. The tumor (1) and the approximate location of the corticospinal tracts are visible. В, С – the results of the same MRI study (Т2 and Т1 images) on a navigation system integrated with MRI tractography. Tumor (1), corticospinal tracts "beginning" in the cortex of the precentral gyrus (GPrC) are highlighted in blue, as well as the measured distance from the tumor to the corticospinal tracts

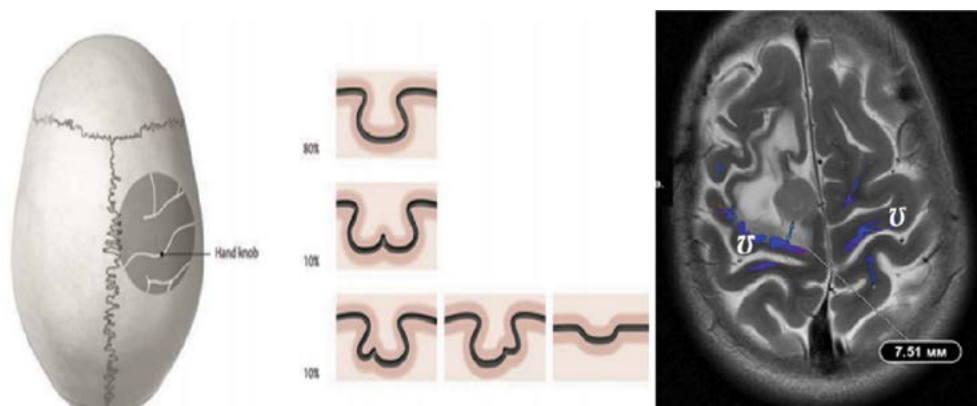


Рис. 2. Варианты формы точки-Ω и частота встречаемости в популяции
Fig. 2. Variants of the shape of the point-Ω and the frequency of occurrence in the population

извилины с помощью МРТ-трактографии, интегрированной в навигационную станцию; анализ связи между расстоянием от края новообразования до кортикоспинальных трактов и частоты развития нового неврологического дефицита после операции, а также влияния МРТ-трактографии на планирование хирургического доступа.

Данные структурной МРТ и МРТ-трактографии изображений каждого пациента перед операцией загружались в навигационную станцию, и выполнялось построение диффузно-тензорных трактограмм. Начало построения МРТ-трактограмм выполнялось в области внутренней капсулы (колена и заднего бедра) и/или ножек среднего мозга. После этого проводилась оценка места «выхода» трактов на кору больших полушарий, их расположения по отношению к новообразованию, деформации, изменения хода и прерывания. Кроме того, измерялось кратчайшее расстояние от трактов до края новообразования в одной из трех проекций, чаще аксиальной.

■ РЕЗУЛЬТАТЫ

Предоперационная МРТ-трактография выполнена 40 пациентам с новообразованиями, расположенными в проекции двигательной коры. Анализ структурной МРТ показал, что у 12 (30%) из них область двигательной коры была значительно изменена и деформирована в связи с объемным воздействием или перитуморозным отеком и определить расположение прецентральной извилины и/или «точки руки» было невозможно (рис. 3).

МРТ-трактография, интегрированная в навигационную систему, позволила выполнить построение кортикоспинальных трактов у всех пациентов. Построение МРТ-трактограмм у 25 пациентов с ненарушенной анатомией прецентральной извилины показало, что кортикоспинальные тракты во всех случаях «начинались» в области прецентральной извилины с небольшим количеством волокон в проекции дополнительной моторной коры (задняя треть верхней лобной извилины) и постцентральной извилины. У пациентов с измененной анатомией в области прецентральной

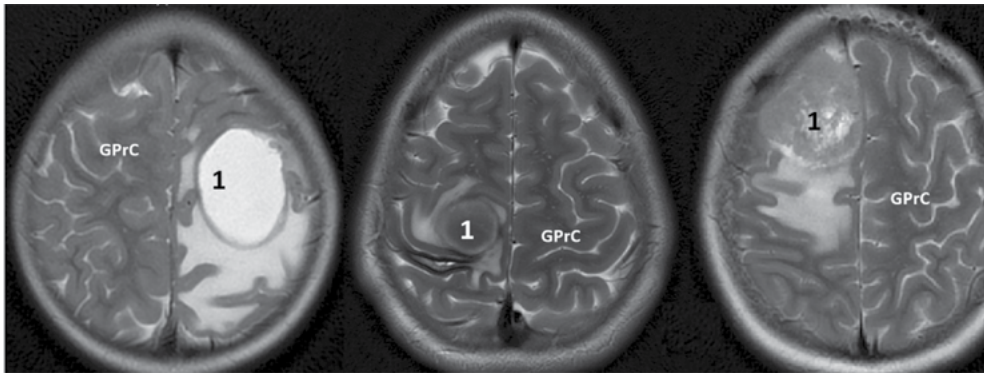


Рис. 3. GPrC – прецентральная извилина «здорового» полушария; 1 – опухоль
Fig. 3. GPrC – precentral gyrus of the "healthy" hemisphere; 1 – tumor

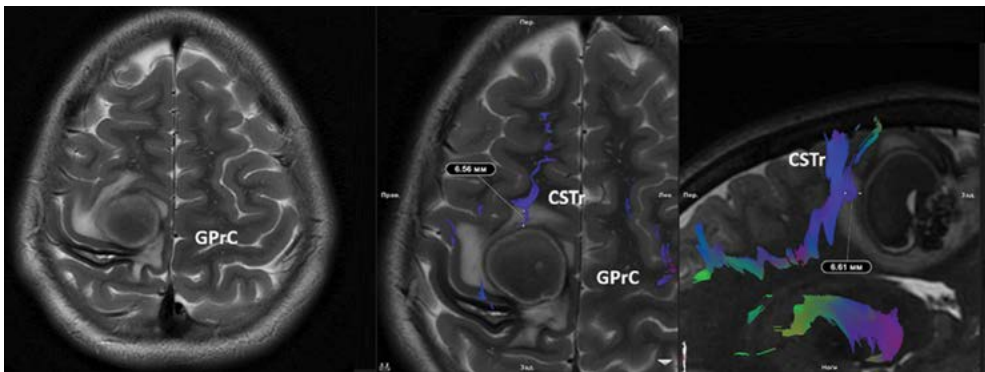


Рис. 4. А – расположение образования относительно деформированной прецентральной извилины; В – расположение новообразования относительно кортикоспинальных трактов по результатам МРТ-трактографии (аксиальная проекция); С – расстояние от процесса до кортикоспинальных трактов (сагиттальная проекция)
Fig. 4. A – the location of the tumor relative to the deformed precentral gyrus; B – the location of the neoplasm relative to the corticospinal tracts according to the results of MRI tractography (axial projection); C – distance from the process to the corticospinal tracts (sagittal projection)

извилины во всех 12 случаях удалось выполнить построение МРТ-трактограмм и оценить место их «начала» на коре больших полушарий, которое, по нашему мнению, соответствует корковому представителю двигательной функции и прецентральной извилины (рис. 4).

Кроме того, установлено, что в 24 (60%) случаях данные МРТ-трактографии были важны при планировании хирургического доступа, безопасной резекции и определении отделов головного мозга, удаление из которых требует использования интраоперационного нейромониторинга (рис. 5).

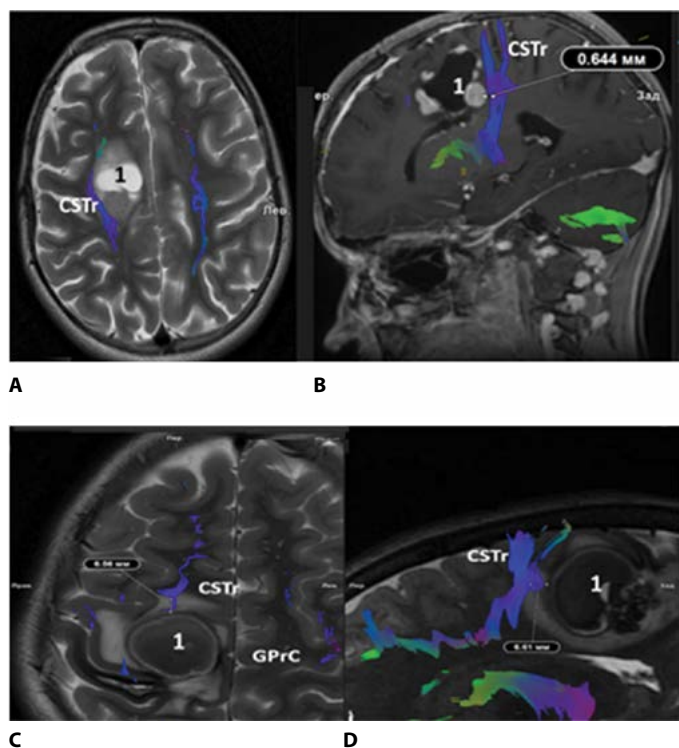


Рис. 5. Опухоли схожей локализации, но различного расположения кортикоспинальных трактов, что необходимо учитывать при выполнении удаления: А, В – кортикоспинальные тракты проходят позади опухоли; С, D – кортикоспинальные тракты проходят кпереди от новообразования

Fig. 5. Tumors of similar localization, but different location of the corticospinal tracts, which must be taken into account when performing the removal: A, B – the corticospinal tracts pass behind the tumor; C, D – corticospinal tracts pass anterior to the neoplasm

МРТ-трактография и новый неврологический дефицит

Из 40 пациентов, которым выполнена МРТ-трактография до операции, гемипарез диагностирован у 10 (25%), в 6 случаях после удаления новообразования он полностью отстроился в течение месяца. Ухудшение функции движения в виде моно- или гемипареза получено в 9 (22,5%) случаях (у 7 развился новый неврологический дефицит, у 2 вырос имеющийся гемипарез), из них у 6 он полностью восстановился до дооперационного уровня в течение 1–3 месяцев. Установлено, что развитие двигательного дефицита после операции было связано с расстоянием от опухоли до кортикоспинальных трактов. У пациентов без ухудшения двигательной функции ($n=31$) медиана расстояния составила 7,0 мм (мин. 2,0 мм; макс. 19,0 мм), медиана расстояния в группе пациентов с развившимися после удаления парезами ($n=9$) составила 4 мм (мин. 1,0 мм; макс. 8,0 мм), разница статистически значима, Р-критерий_{Манна – Уитни} = 0,0072 (рис. 6).

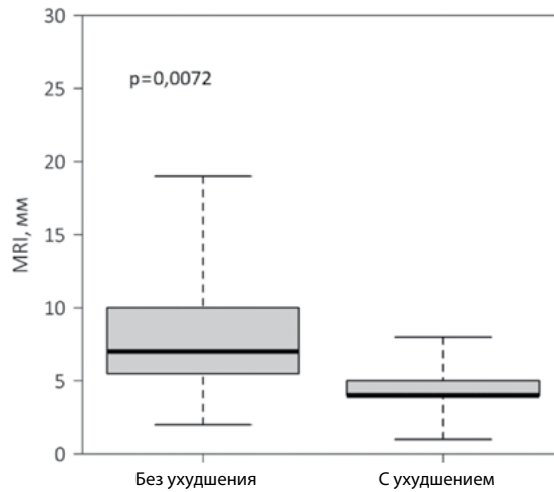


Рис. 6. Распределение расстояния от новообразования до кортикоспинальных трактов у пациентов с ухудшением неврологического статуса и без ухудшения
Fig. 6. Distance distribution from neoplasm to corticospinal tracts in patients with and without deterioration in neurological deficit

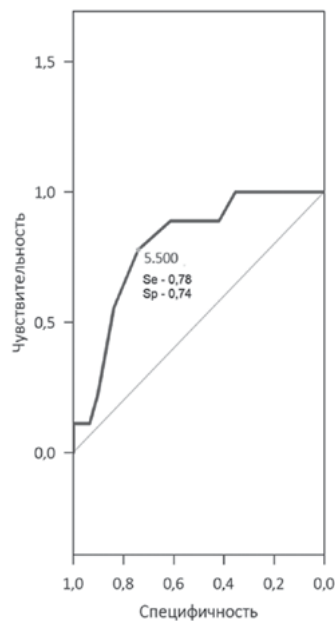


Рис. 7. ROC-кривая, характеризующая зависимость вероятности развития новых двигательных нарушений (парезов) от расстояния от новообразования до кортикоспинальных трактов
Fig. 7. ROC-diagram, characterizing the dependence of the probability of developing new motor disorders (paresis) depending on the distance from the tumor to the corticospinal tracts

Результат регрессионного анализа влияния расстояния от новообразования до кортикоспинальных трактов на риск возникновения двигательных нарушений
The result of receiver operating characteristic of the influence of the distance from the tumor to the corticospinal tracts on the risk of motor disorders

Расстояние от опухоли до кортикоспинальных трактов	В (регрессионный коэффициент)	ОШ	95% ДИ ОШ	P
<5,5 мм		1		
≥5,5 мм	0,43	1,47	1,15–1,88	0,0037

Для определения расстояния от опухоли до кортикоспинальных трактов, которое приводит к возникновению неврологического дефицита, был проведен ROC-анализ (рис. 7).

Площадь под ROC-кривой составила $AUC=0,80\pm0,03$ (95% ДИ 0,65–0,95), что говорит о том, что расстояние от опухоли до кортикоспинальных трактов может быть предиктором возникновения неврологического дефицита, расстояние менее 5,5 мм сопряжено с риском развития нового двигательного дефицита, который наступает с чувствительностью 78% и специфичностью 74%.

Для установления отношения шансов возникновения нового неврологического дефицита в группе с расстояниями менее 5,5 мм и ≥5,5 мм была построена однофакторная прогностическая модель с использованием метода бинарной логистической регрессии. Результаты анализа представлены в таблице.

■ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод диффузно-тензорной трактографии признан инструментом для визуализации трактов белого вещества in vivo. Несмотря на то что МРТ-трактография имеет немало ограничений, связанных с артефактами в процессе исследования, и даже утверждение о том, что трактография предоставляет незначительную дополнительную информацию для функционального картирования мозга, ее применение набирает все большую популярность [19–22]. Проведены исследования, показавшие связь между дооперационным двигательным дефицитом и поражением кортикоспинальных трактов по данным МРТ-трактографии [14, 15]. Однако до настоящего времени методика не является рутинным исследованием в предоперационном планировании удаления опухолей головного мозга [18]. Использование результатов МРТ-трактографии дает общую картину расположения новообразования и функционально значимых проводящих путей головного мозга, что пытаются использовать для индивидуальной оценки риска операции и объема безопасной резекции, а также индивидуального нейрохирургического планирования [7, 11, 12].

Абсолютное большинство публикаций базируется на результатах изучения у взрослых [7–10]. Работы, касающиеся пациентов детского возраста, малочисленны и описывают небольшое число наблюдений. Так, К. Helton и соавторы в 2013 году описали эффективность МРТ диффузно-тензорных изображений у семи пациентов детского возраста, авторы получили связь между показателем фракционной анизотропии и тяжестью неврологического дефицита, но построение МРТ-трактографии по результатам диффузно-тензорных изображений не выполнялось [9, 13]. По данным Lorenzen A. и соавторов (2018), результаты предоперационной визуализации повлияли



на принятие решений и/или нейрохирургическое планирование в 10 из 28 случаев, а у 4 пациентов данные функциональной МРТ и МРТ-трактографии изменили хирургический подход и объем удаления, что подчеркивает пользу от совмещения данных этих методов [6]. В нашей группе пациентов с помощью МРТ-трактографии, интегрированной в навигационную станцию, было установлено расположение прецентральной извилины у 35% (n=14) пациентов и ее данные повлияли на нейрохирургическое планирование и подход у 60% (n=24) пациентов.

Данные предоперационного обследования помогают и при обсуждении возможного исхода предстоящей операции с родственниками пациента, что очень важно у детей, так как стойкий неврологический дефицит может существенно влиять на качество жизни [6, 16, 17]. Однако такое планирование имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, изучение расположения трактов и всех данных МРТ-исследования возможно только на станции аппарата МРТ; во-вторых, на станции МРТ невозможно измерять расстояние от патологического процесса до изучаемых трактов, в том числе в различных проекциях; в-третьих, невозможно точно оценить, с каким отделом коры имеет связь конкретный тракт, например, невозможно видеть «начало» кортикоспинальных трактов в области прецентральной извилины. Исследования с использованием МРТ-трактографии, интегрированной в навигационную станцию, стали публиковаться только в последние годы. Так, в работе Jianwei Shi (2022) описана положительная роль применения технологии при удалении новообразований височно-затылочной области вблизи optic radiation у 28 пациентов в возрасте от 12 до 78 лет [23]. Результаты измерения расстояния от патологического процесса до функциональных трактов стали публиковаться только в последние годы. В работе Erin J. Meyer в 2017 году проведен ретроспективный анализ результатов удаления опухолей различной степени злокачественности у 60 взрослых пациентов, которым выполнялась МРТ-трактография. Изучив расстояние от опухоли до нескольких различных трактов белого вещества – верхнего продольного пучка, поясной извилины и кортикоспинального тракта и послеоперационный неврологический статус, авторы установили, что расстояние до ипсилатерального кортикоспинального тракта менее 10 мм увеличивает риск развития нового неврологического дефицита. У 46% пациентов с расстоянием менее 10 мм развился новый двигательный дефицит после удаления [7]. В нашем исследовании риск нового двигательного дефицита также зависел от расстояния, но оно оказалось значительно меньше. Таким образом, использование МРТ ДТТ в предоперационном планировании и оценке риска развития нового неврологического дефицита у детей с новообразованиями функционально значимых отделов коры головного мозга играет важную роль, которую еще предстоит уточнить в процессе будущих исследований.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на достижения в нейрохирургической технике, операции в проекции двигательных отделов коры головного мозга и кортикоспинальных трактов связаны с риском развития нового неврологического дефицита. МРТ-трактография, интегрированная в навигационную систему, играет важную роль в предоперационном планировании и оценке риска развития нового неврологического дефицита. Расстояние от новообразования до кортикоспинальных трактов менее 5,5 мм сопряжено с риском развития нового неврологического дефицита. Поскольку МРТ-трактография

является неинвазивным методом, мы полагаем, что она должна входить в стандартный протокол предоперационного МРТ-исследования, особенно в детской практике.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Vlieger E.J., Majoie C.B., Leenstra S., Den Heeten G.J. Functional magnetic resonance imaging for neurosurgical planning in neurooncology. *Eur Radiol.* 2004;14:1143–1153.
2. Tieleman A., Deblaere K., Van Roost D., Van Damme O., Achten E. Preoperative fMRI in tumour surgery. *Eur Radiol.* 2009;19:2523–2534. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00330-009-1429-z>
3. Leach J.L., Holland S.K. Functional MRI in children: clinical and research applications. *Pediatr Radiol.* 2010;40:31–49. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00247-009-1452-x>
4. Wilke M., Holland S.K., Mysers J.S., Schmithorst V.J., Ball W.S.J. Functional magnetic resonance imaging in pediatrics. *Neuropediatrics.* 2003;34:225–233.
5. Ulmer J.L., Salvan C.V., Mueller W.M., Krouwer H.G., Stroe G.O., Aralasmak A., Prost R.W. The role of diffusion tensor imaging in establishing the proximity of tumor borders to functional brain systems: implications for preoperative risk assessments and postoperative outcomes. *Technol Cancer Res Treat.* 2004;3:567–576. Available at: <https://doi.org/10.1177/153303460400300606>
6. Lorenzen A., Groeschel S., Ernemann U., Wilke M., Schuhmann M.U. Role of presurgical functional MRI and diffusion MR tractography in pediatric low-grade brain tumor surgery: a single-center study. *Child's Nervous System.* 2018;34:2241–2248. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00381-018-3828-4>
7. Meyer E.J., Gaggli W., Gilloon B., Swan B., Greenstein M., Voss J. The Impact of Intracranial Tumor Proximity to White Matter Tracts on Morbidity and Mortality: A Retrospective Diffusion Tensor Imaging Study. *Neurosurgery.* 2017;80(2):193–200. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00381-018-3828-4>
8. Fang S., Liang J., Qian T., Wang Y., Liu X., Fan X., Li S., Wang Y., Jiang T. Anatomic Location of Tumor Predicts the Accuracy of Motor Function Localization in Diffuse Lower-Grade Gliomas Involving the Hand Knob Area. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2017;38(10):1990–1997. Available at: <https://doi.org/10.3174/ajnr.A5342>
9. Helton K.J., Phillips N.S., Khan R.B., Boop F.A., Sanford R.A., Zou P., Li C.S., Langston J.W., Ogg R.J. Diffusion tensor imaging of tract involvement in children with pontine tumors. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2006;27(4):786–793.
10. Ille S., Engel L., Kelm A., Meyer B., Krieg S.M. Language-Eloquent White Matter Pathway Tractography and the Course of Language Function in Glioma Patients. *Front Oncol.* 2018;8:572. Available at: <https://doi.org/10.3389/fonc.2018.00572>
11. Wu J.S., Zhou L.F., Tang W.J. Clinical evaluation and follow-up outcome of diffusion tensor imaging-based functional neuronavigation: a prospective, controlled study in patients with gliomas involving pyramidal tracts. *Neurosurgery.* 2007;61(5):948–939; discussion 935–948.
12. Gonzalez-Darder J.M., Gonzalez-Lopez P., Talamantes F. Multimodal navigation in the functional microsurgical resection of intrinsic brain tumors located in eloquent motor areas: role of tractography. *Neurosurg Focus.* 2010;28(2):E5.
13. Helton K.J., Phillips N.S., Khan R.B., Boop F.A., Sanford R.A., Zou P., Li C.S., Langston J.W., Ogg R.J. Diffusion tensor imaging of tract involvement in children with pontine tumors. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2006;27(4):786–793.
14. Ahn S., Lee S.K. Diffusion Tensor Imaging: Exploring the Motor Networks and Clinical Applications. *Korean J Radiol.* 2011;12(6):651–61. Available at: <https://doi.org/10.3348/kjr.2011.12.6.651>
15. Laundre B.J., Jellison B.J., Badie B., Alexander A.L., Field A.S. Diffusion tensor imaging of the corticospinal tract before and after mass resection as correlated with clinical motor findings: preliminary data. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2005;26:791–796.
16. Sievert A.J., Fisher M.J. Pediatric low-grade gliomas. *J Child Neurol.* 2009;24:1397–1408. Available at: <https://doi.org/10.1177/0883073809342005>
17. Liegeois F., Cross J.H., Gadian D.G., Connelly A. Role of fMRI in the decision-making process: epilepsy surgery for children. *J Magn Reson Imaging.* 2006;23:933–940.
18. Manan A.A., Yahya N., Idris Z., Manan H.A. The Utilization of Diffusion Tensor Imaging as an Image-Guided Tool in Brain Tumor Resection Surgery: A Systematic Review. *Cancers.* 2022;14(10):2466. Available at: <https://doi.org/10.3390/cancers14102466>
19. Essayed W.J., Zhang F., Unadkat P., Cosgrove G.R., Golby A.J., O'Donnell L.J. White matter tractography for neurosurgical planning: A topography-based review of the current state of the art. *NeuroImage. Clinical.* 2017;15:659–672. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2017.06.011>
20. Assaf Y., Pasternak O. Diffusion Tensor Imaging (DTI)-based White Matter Mapping in Brain Research: A Review. *J. Mol. Neurosci.* 2008;34:51–61.
21. Soares J.M., Marques P., Alves V., Sousa N. A hitchhiker's guide to diffusion tensor imaging. *Front. Neurosci.* 2013;7:31. Available at: <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00031>
22. Van Hecke W., Emsell L., Sunaert S. *Diffusion Tensor Imaging: A Practical Handbook.* Springer: New York, NY, USA. 2016;1–440.
23. Shi J., Lu D., Pan R., Chen H., Teng H., Xu Y., Bo F., Zhou Q., Zhang Y. Applications of diffusion tensor imaging integrated with neuronavigation to prevent visual damage during tumor resection in the optic radiation area. *Front. Oncol.* 2022;12:955418. Available at: <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.955418>