

# Функциональная магнитно-резонансная томография головного мозга для локализации речевой коры в предоперационном планировании. Разбор клинических случаев

А. С. Смирнов<sup>\*,1</sup>, М. Г. Шараев<sup>2</sup>, Т. В. Мельникова-Пицхелаури<sup>1</sup>,  
Э. Л. Погосбекян<sup>1</sup>, В. Ю. Жуков<sup>1</sup>, С. Б. Буклина<sup>1</sup>, А. А. Огурцова<sup>1</sup>,  
А. Е. Бурнаев<sup>2</sup>, А. В. Бернштейн<sup>2</sup>, Д. И. Пицхелаури<sup>1</sup>,  
В. Н. Корниенко<sup>1</sup>, И. Н. Пронин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии  
им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий

## Human Brain Functional Magnetic Resonance Imaging for Language Cortex Localization in Presurgical Brain Mapping. Case report

A. S. Smirnov<sup>\*,1</sup>, M. G. Sharaev<sup>2</sup>, T. V. Mel'nikova-Pitskhelauri<sup>1</sup>,  
E. L. Pogosbekyan<sup>1</sup>, V. Ju. Zhukov<sup>1</sup>, S. B. Buklina<sup>1</sup>, A. A. Ogurtsova<sup>1</sup>,  
A. E. Burnaev<sup>2</sup>, A. V. Bernstein<sup>2</sup>, D. I. Pitskhelauri<sup>1</sup>,  
V. N. Kornienko<sup>1</sup>, I. N. Pronin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> N. N. Burdenko National Medical Scientific Center for Neurosurgery, Ministry of Healthcare  
of Russia

<sup>2</sup> Skolkovo Institute of Science and Technology

### Реферат

В нейрохирургической практике в качестве основного метода неинвазивного предоперационного планирования при локализации опухоли вблизи функционально значимых зон коры используется стимулзависимая функциональная МРТ (фМРТс) с двигательными или речевыми парадигмами.

*\* Смирнов Александр Сергеевич, врач отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Тел.: +7 (926) 905-55-61. Электронная почта: alex.smirnof@gmail.com.  
ORCID: 0000-0001-9313-6350*

*Smirnov Aleksandr Sergeevich, neuroradiologist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods Federal State Autonomous Institution «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) 905-55-61. E-mail: alex.smirnof@gmail.com.  
ORCID: 0000-0001-9313-6350*

Этот метод способен предоставить важную информацию об индивидуальных особенностях локализации значимых зон коры головного мозга пациента. Однако результат функционального МР-исследования во многом зависит от способности пациента четко выполнять типовые инструкции, которые могут нарушаться или даже не выполняться пациентами с опухолями головного мозга. В таких случаях возможно использование метода фМРТ в состоянии покоя (фМРТп, resting-state fMRI). В данной работе, которая является частью проекта по изучению функциональных изменений нейрональной активности мозга, вызванных глиомами, мы приводим два наблюдения пациентов с опухолями, локализующимися в левом полушарии головного мозга в лобной и височной областях, вблизи зон Брока и Вернике. На основе сравнения результатов методов фМРТс, фМРТп и данных прямой кортикальной стимуляции, обсуждается методика определения точности совпадения активаций, полученных тремя методами.

**Ключевые слова:** МРТ головного мозга, функциональная МРТ, фМРТ покоя, предоперационное планирование, картирование мозга, глиальная опухоль, функционально значимые зоны.

## Abstract

In neurosurgical practice of neurosurgery, a task-based functional magnetic resonance imaging (tb-fMRI) with motor and speech paradigms is a common method in preoperative planning lesion location around eloquent areas of the brain. This method can improve the surgical strategy with relevant information obtained non-invasively. But in majority of cases the results of tb-fMRI depend on the patient's ability to follow instructions during study, which can be impaired due to brain tumor. When tasks cannot be performed by patient, the resting-state fMRI method (rs-fMRI) is more preferable. In this work, that is a part of the scientific project in assessment of neuronal activity in cases with brain gliomas of various localization, we present two cases of patients with glial tumors localized in the left hemisphere of the brain: frontal and temporal lobes with close proximity to Broca and Wernike areas. Based on a comparison of the results of tb-fMRT, rs-fMRT as well as direct cortical stimulation data, we propose a method for estimation the accuracy of coincidence in cortical activations obtained by three methods.

**Key words:** Brain Magnetic Resonance Imaging, Functional Magnetic Resonance Imaging, Resting-State Functional Magnetic Resonance Imaging, Presurgical Planning, Brain Mapping, Glioma, Eloquent Area.

## Актуальность

«Золотым стандартом» картирования коры головного мозга остается «краниотомия в сознании» (awake craniotomy), при которой во время операции сохраняется полный речевой контакт с пациентом [1]. Наибольшую сложность при оперативном лечении опухолей мозга представляет речевая область коры, в которой отмечается высокая вариабельность зон активации [2, 12]. Более того, поврежденный мозг, особенно из-за масс-эффекта и функциональной реорганизации, обусловленных ростом опухоли, как правило, усложняет картирование речевых зон [5].

Несмотря на многообещающие результаты использования метода функциональной МРТ в предоперационном картировании, ряд вопросов, начиная от сопоставимости результатов фМРТ до точности картирования достаточной для применения в нейрохирургической практике, широко обсуждаются в настоящее время [4, 7, 11, 13]. В особенности эти вопросы являются остро дискуссионными в отношении картирования мозговых центров при диффузных опухолях глиального ряда [16, 17].

Настоящее исследование посвящено изучению локализации речевых зон

Брока и Вернике. В качестве наиболее репрезентативных иллюстраций применения оригинальной методики рассмотрены два наблюдения пациентов с глиальными опухолями в левом полушарии головного мозга.

## Клинические случаи

### Наблюдение 1

Пациентка С., 34 года. Из анамнеза: в 2005 г. была выявлена диффузная опухоль лобно-височно-островковой области левого полушария, провоцирующая развитие эпилептических приступов с потерей сознания и снижением чувствительности в правых конечностях. В 2006 г. была проведена стереотаксическая биопсия опухоли с установлением гистологического диагноза «олигоастроцитомы». Пациентка прошла несколько курсов химиотерапии, постоянно получала противосудорожную терапию. После лечения неоднократно проводились исследования МРТ и ПЭТ-КТ головного мозга, с подтверждением стабилизации процесса. В НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко пациентка обратилась в 2019 г. в связи с участвовавшими эпилептическими приступами.

На этапе предоперационного планирования проведены МРТ головного мозга с контрастным усилением, выявившая продолженный рост опухоли; функциональная стимулзависимая МРТ по разработанному в центре протоколу с получением функциональных данных речевой активации и фМРТ в состоянии покоя с оценкой речевой сети. При фМРТс пробе с генерацией предложений по словам оценивалась активность левой нижней лобной извилины в треугольной части, соответствующая зоне Брока (рис. 1). В речевой сети фМРТп были выделены участки

активации в соответствующих отделах нижней лобной извилины левого полушария (рис. 1, а – г).

Проведено оперативное вмешательство с «пробуждением» пациента во время операции и применением прямой кортикальной стимуляции близлежащих к опухоли функциональных зон. Использовался моноэлектрод с силой тока 10 мА. Обнаружена зона Брока типичной локализации — в левой нижней лобной извилине. При прямой кортикальной стимуляции в этой зоне регистрировалось нарушение речевой продукции в виде задержки речи и персеверации слов и литеральных парафазий. В процессе прямой кортикальной стимуляции фиксировались точки, полученные на поверхности коры головного мозга. Выявленные точки локализовались по верхнему контуру треугольной части левой нижней лобной извилины, по границе зон активаций, полученных на основе обеих методик фМРТ.

После прямого картирования коры выполнена субтотальная резекция опухоли с остатками части глиомы в области подкорковых ядер. По результатам биопсии — анапластическая олигодендроглиома без выявленной мутации гена IDH1 R132, с мутацией гена IDH2 R172K, WHO Grade III. Клинически после операции отмечались элементы эфферентной афазии, изменение почерка по подкорковому типу, которые регрессировали без дополнительного лечения, что говорило об их функциональной этиологии.

### Наблюдение 2

Пациентка А., 32 года. Из анамнеза: в 2019 г. госпитализирована в областную городскую больницу в связи с головными

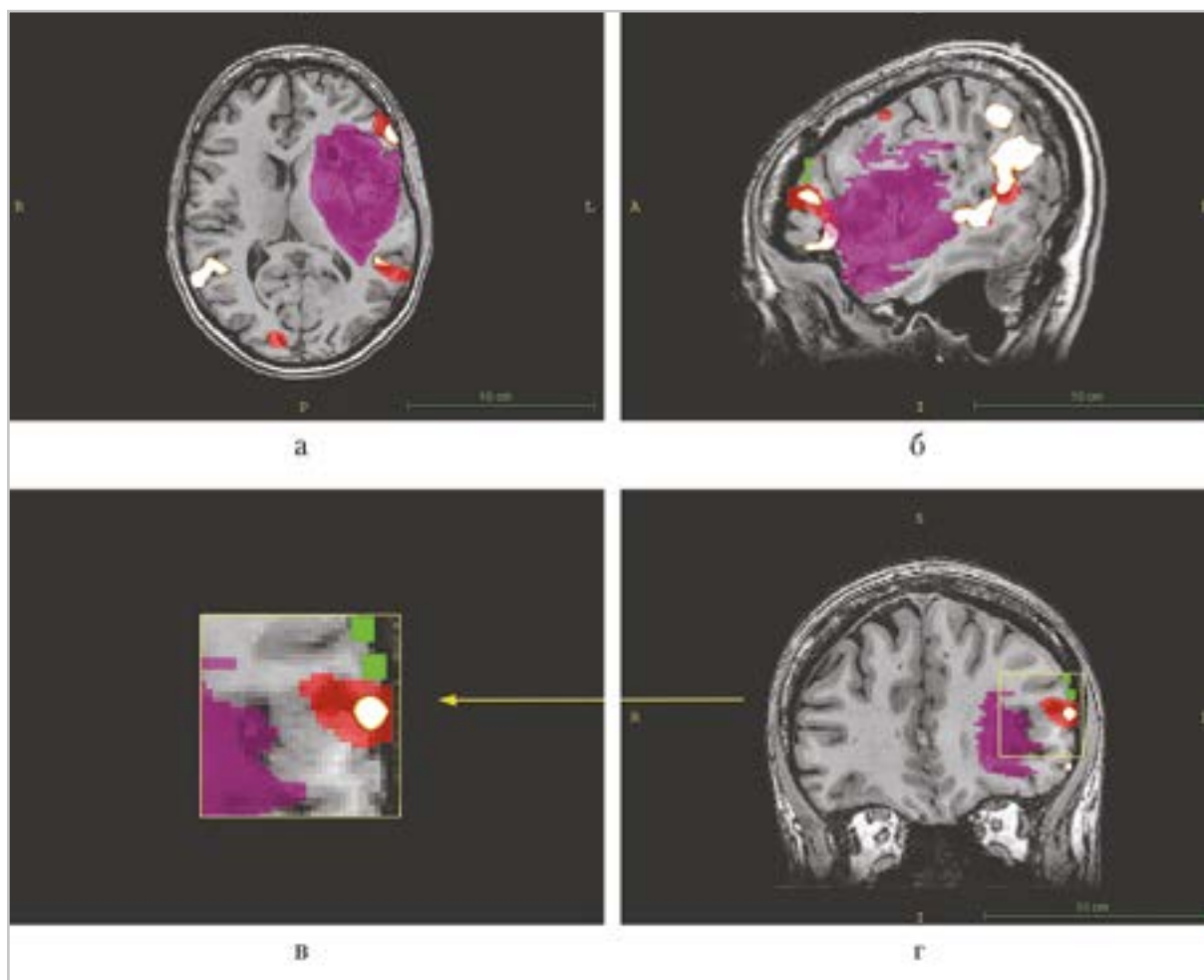


Рис. 1. МР-томограммы пациентки 1. Анапластическая олигодендроглиома (WHO Grade III) левой лобно-височно-островковой области. МРТ в аксиальной (а), сагиттальной (б) и фронтальной (в) проекциях. Совмещение активации стимулзависимой фМРТ (фМРТс), фМРТ в состоянии покоя (фМРТп) и интраоперационных ответов. Увеличенный фрагмент области интереса (г). Красным обозначается активация фМРТс, белым – фМРТп, зеленым – «положительные» точки интраоперационного картирования

болями и единичным генерализованным судорожным припадком. С подозрением на ишемический инсульт была проведена МРТ головного мозга, выявившая внутримозговую опухоль левой височной доли, в связи с чем обратилась в НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко.

Перед оперативным вмешательством, как и в предыдущем случае, проведено комплексное МРТ-обследование головного мозга, включающее фМРТс

речевых зон коры. При проведении пробы фМРТс с прослушиванием текста оценивалась активация в дорзальной части левой верхней височной извилины и левой ангулярной области – слуховая кора и зона Вернике. В речевой сети при фМРТп выделялись зоны активации в левой височной и теменной долях (рис. 2, а – г).

Проведено оперативное вмешательство с «пробуждением» и интра-

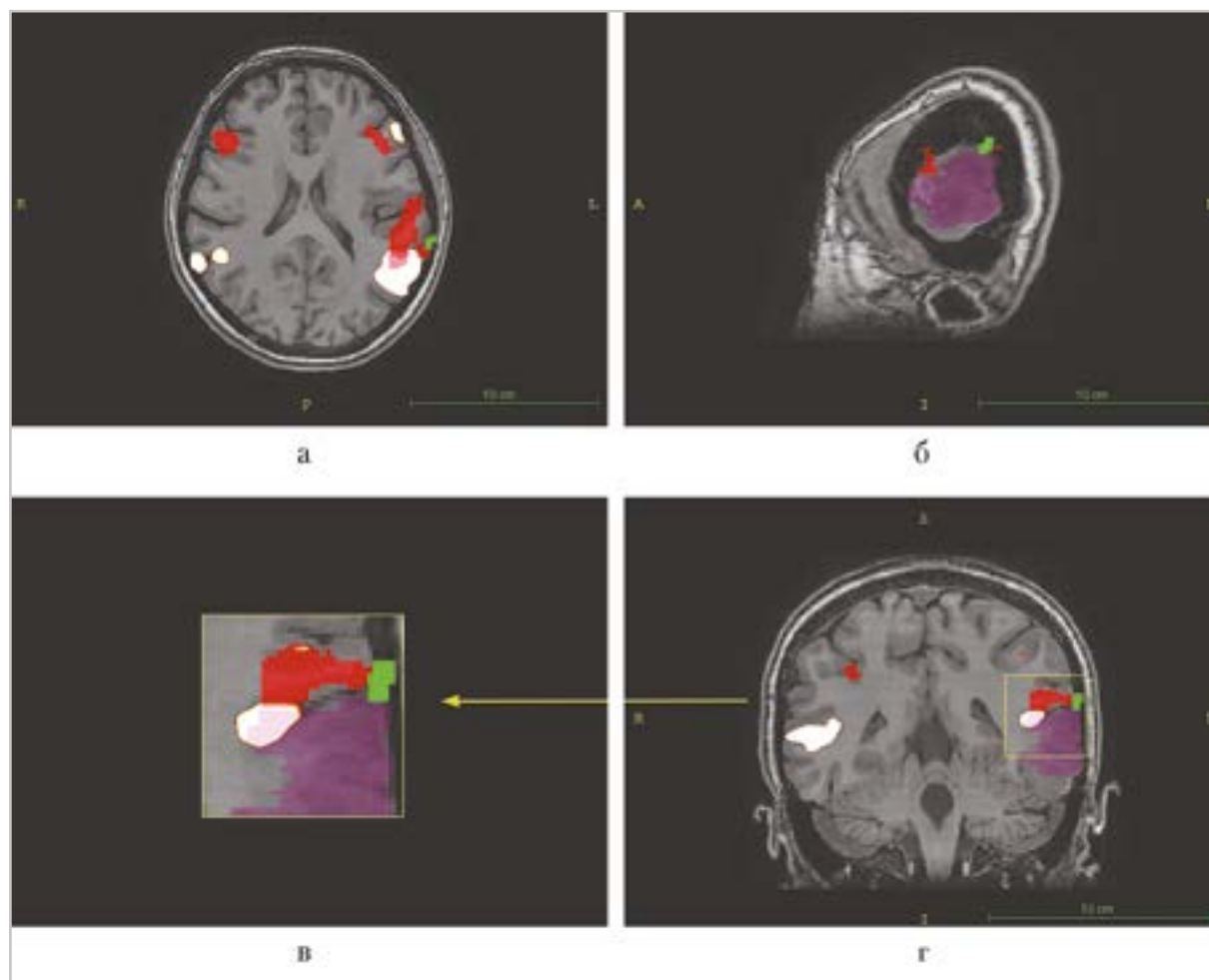


Рис. 1. МР-томограммы пациентки 2. Анапластическая олигодендроглиома (WHO Grade III) левой височной области. МРТ в аксиальной (а), сагиттальной (б) и фронтальной (г) проекциях. Совмещение активации стимулзависимой фМРТ (фМРТс), фМРТ в состоянии покоя (фМРТп) и интраоперационных ответов. Увеличенный фрагмент области интереса (в). Красным обозначается активация фМРТс, белым — фМРТп, зеленым — «положительные» точки интраоперационного картирования

операционным картированием коры. В ходе электростимуляции моно- и биполярными электродами, с силой тока 4–5 мА, были зарегистрированы нарушения речевой продукции в дорзальной части верхней височной извилины, соответствующие зоне Вернике. Точки, полученные при проведении прямой кортикальной стимуляции, фиксировались: они были расположены в проекции задневерхней части левой верхней

височной извилины, по контуру пересекающихся на данном участке зон активации фМРТс и фМРТп.

После картирования коры выполнено радикальное удаление опухоли в пределах неизмененных тканей. При гистологическом исследовании выявлена анапластическая олигодендроглиома с мутацией IDH1 R132H, неметилированной промоторной областью гена MGMT, WHO Grade III. В раннем послеопера-

ционном периоде: дефицит понимания обращенной речи, номинативной речи и слухоречевой памяти, нарушение кинетического и пространственного праксиса, соответственно зоне операционных изменений. Динамики изменений не отмечалось.

## Обсуждение

Степень соответствия полученных карт активации фМРТп и фМРТс в обоих наблюдениях оценивалась с помощью коэффициента Дайса (Dice coefficient), значения которого показывают степень перекрытия активных вокселей в обеих сопоставляемых картах. Перекрытие карт активации фМРТп и фМРТс оценивалось только в пределах коры мозга, без учета подкорковых структур и белого вещества.

При сопоставлении результатов перекрытия функциональных зон в обоих наблюдениях отмечалась низкая степень перекрытия речевой активации — зон Брока, Вернике, мимической мускулатуры по фМРТс и речевой сети фМРТп (коэффициент Дайса — 0,11 и 0,10 соответственно). Это может быть обусловлено большей индивидуальной вариабельностью очагов активации и более мелким их калибром. Полученные в результате интраоперационного картирования точки подтверждали выявленные зоны Брока (в первом наблюдении) и Вернике (во втором наблюдении) при стимулзависимой фМРТ и фМРТ в состоянии покоя. Расположение интраоперационных точек по границе активации может быть обусловлено частичным смещением вещества мозга в момент трепанации и последующей интерполяцией точек при обработке результатов.

Интеграция результатов метода фМРТп в предоперационную оценку

опухолевых поражений головного мозга корковой локализации как альтернативного методу фМРТс все более завоевывает внимание исследователей. Однако достаточная для нейрохирургического планирования точность и надежность этого метода до сих пор неясны. Используемый ранее метод неинвазивного картирования функционально значимых зон — фМРТс полностью не оправдал себя по точности применения в случаях глиальных опухолей, локализованных вблизи речевой коры. Так, в недавнем исследовании G. Kuchcinski et al. (2015) было продемонстрировано, что чувствительность фМРТ-картирования для речевых зон составила только 37,1 % [9]. По мнению L. Junck et al. (2015) это указывает на то, что классическая фМРТс «еще не готова к прайм-тайм-контролю» резекции глиомы [8], несмотря на опубликованные исследования с более оптимистичными результатами [6, 14]. Важно учитывать, что не существует единого стандартизованного протокола фМРТс для локализации всех соответствующих речевых областей, а различия в экспериментальном дизайне и выборе парадигм отражаются и на результатах проводимых исследований. Более того, пациенты с афазией, алексией или когнитивными расстройствами, которым требуется точное предоперационное планирование, часто не способны адекватно выполнять инструкции. Предложенный метод фМРТп преодолевает подобные ограничения, не предъявляя никаких требований к пациенту во время МР-сканирования. Важно отметить, что различные функциональные сети могут быть оценены в рамках одного исследования и одного набора данных с использованием различных аналитических методов для фМРТп.

Различия между применяемыми методами, стимулзависимой и фМРТ в состоянии покоя, возможно, могут способствовать получению отличающихся друг от друга результатов: два функциональных метода являются по сути разными и измеряют различные аспекты функций мозга. Так, карты фМРТс визуализируют активацию только в вовлекаемых участках мозга, а фМРТп-картирование отражает всю внутреннюю его активность. Это может объяснить, почему степень соответствия между представленными двумя методами не является полномасштабной.

На текущий момент, в контексте предоперационного картирования, важным для нас остается вопрос соответствия функционально значимых зон активаций при фМРТс с выявляемыми нейронными сетями состояния покоя при фМРТп. На примере двух наблюдений мы рассматриваем соответствие результатов двух методов функциональной МРТ с использованием модификации независимых компонент (ICA), а именно с пространственными ограничениями. Этот метод позволяет выделить значимые сети состояния покоя (нейрональные сети) без построения параметрической модели активации в целом. Проверка точности результатов в этих наблюдениях проводилась с помощью данных прямой кортикальной стимуляции и показала удовлетворительные результаты.

Как считают авторы Н. I. Sair et al. (2017) из исследовательской группы Университетской клиники Johns Hopkins, первые исследования по изучению речевой коры с фМРТп проводились в малочисленных группах пациентов с опухолями головного мозга и имели хорошее соответствие с фМРТс и

прямой стимуляцией, но с расширением выборки в последних исследованиях, отмечена значительная вариабельность локализации активаций речевых зон [15]. Так, J. Lu et al. (2017) в группе 7 пациентов с глиомами достигли чувствительности фМРТп в результатах картирования речевых зон равной 87 % только после расширения радиуса сопоставления интраоперационных точек до 10 мм, тогда как первоначальная чувствительность фМРТп составляла 60,9 % [10]. В другом исследовании, Branco P. et al. (2016), основанном также на методе ICA, было изучено соответствие между речевыми картами, полученными по данным фМРТс и фМРТп у пациентов с поражениями головного мозга (опухоли, эпилепсия), с использованием коэффициента Дайса [3]. В результате было обнаружено умеренное соответствие между картами фМРТс и фМРТп, особенно в локализованных речевых областях (среднее значение коэффициента Дайса = 0,248 по всему мозгу).

В нашем материале соответствие между результатами обоих методов фМРТ оценивалось с применением пространственного сходства между картами. Мы также применили коэффициент Дайса, получив схожие низкие значения корреляции в обоих наблюдениях. Несмотря на низкое значение коэффициента Дайса, все найденные интраоперационные точки были расположены на допустимом (до 10 мм) расстоянии от зон активации. Мы считаем, что коэффициент Дайса между фМРТп и фМРТс по всему мозгу может быть не оптимальной мерой качественного соответствия в локализации речевых областей. Для получения лучших результатов, вероятно, потребуются новые подходы к их обра-

ботке и оценке, в частности, разработка алгоритма с построением индивидуальных бинарных масок.

Идентификация речевых индивидуальных компонент является более сложной задачей, чем, например, двигательных или зрительных, так как речевые зоны имеют более высокую вариативность расположения и сопряжены с когнитивными функциями, такими как понимание, производство, восприятие. Важно помнить, что идентификация любой нейронной сети усугубляется наличием патологического процесса, который реорганизует функциональную связность, что еще более усложняет задачу выявления корреляционных составляющих при анализе и обработке данных.

## Выводы

Данные по локализации речевых зон коры на основе двух методов функциональной МРТ-стимулзависимой и в состоянии покоя, полученные на этапе предоперационного планирования, показали аналогичные, но не эквивалентные результаты, хотя и были подтверждены данными интраоперационной стимуляции. Приведенные клинические наблюдения показывают перспективу использования метода фМРТ в состоянии покоя в хирургическом планировании глиом, локализующихся в речевых и близлежащих областях, особенно у пациентов с неврологическим дефицитом, вызванным опухолью. Это требует дальнейшего совершенствования методологических решений и их стандартизации, а также проведения анализа исследований с участием большой выборки.

## Список литературы/References

1. *De Benedictis A., Moritz-Gasser S., Duffau H.* Awake mapping optimizes the extent of resection for low-grade gliomas in eloquent areas. *Neurosurg.* 2010. V. 66. No. 6. P. 1074–1084.
2. *Benjamin C. F., Walshaw P. D., Hale K. et al.* Presurgical language fMRI: Mapping of six critical regions. *Human Brain Mapping.* 2017. V. 38. No. 8. P. 4239–4255.
3. *Branco P., Seixas D., Castro S. L.* Resting-state functional magnetic resonance imaging for language preoperative planning. *Frontiers in Human Neuroscience.* 2016. V. 10.
4. *Branco P., Seixas D., Castro S. L.* Temporal reliability of ultra-high field resting-state MRI for single-subject sensorimotor and language mapping. *NeuroImage.* 2018. V. 168. P. 499–508.
5. *Forster M.-T., Hattingen E., Senft C. et al.* Navigated transcranial magnetic stimulation and functional magnetic resonance imaging: advanced adjuncts in preoperative planning for central region tumors. *Neurosurg.* 2011. V. 68. No. 5. P. 1317–1325.
6. *Giussani C., Roux F.-E., Ojemann J. et al.* Is preoperative functional magnetic resonance imaging reliable for language areas mapping in brain tumor surgery? Review of language functional magnetic resonance imaging and direct cortical stimulation correlation studies. *Neurosurg.* 2010. V. 66. No. 1. P. 113–120.
7. *Hart M. G., Price S. J., Suckling J.* Connectome analysis for pre-operative brain mapping in neurosurgery. *British J. of Neurosurg.* 2016. V. 30. No. 5. P. 506–517.
8. *Junck L., Hervey-Jumper S. L., Sagher O.* Resection of gliomas around language areas: Can fMRI contribute? *Neurol.* 2015. V. 84. No. 6. P. 550–551.
9. *Kuchcinski G., Mellerio C., Pallud J. et al.* Three-tesla functional MR language mapping: Comparison with direct cortical



- stimulation in gliomas. *Neurol.* 2015. V. 84. No. 6. P. 560–568.
10. *Lu J., Zhang H., Hameed N. U. F. et al.* An automated method for identifying an independent component analysis-based language-related resting-state network in brain tumor subjects for surgical planning. *Scientific Reports.* 2017. V. 7. No. 1. P. 13769.
  11. *Meier M. P., Ilmberger J., Fesl G. et al.* Validation of functional motor and language MRI with direct cortical stimulation. *Acta Neurochirurgica.* 2013. V. 155. No. 4. P. 675–683.
  12. *Ojemann G., Mateer C.* Human language cortex: localization of memory, syntax, and sequential motor-phoneme identification systems. *Science.* 1979. V. 205. No. 4413. P. 1401–1403.
  13. *Rosazza C., Minati L.* Resting-state brain networks: literature review and clinical applications. *Neurological Sci.* 2011. V. 32. No. 5. P. 773–785.
  14. *Roux F.-E., Boulanouar K., Lotterie J.-A. et al.* Language functional magnetic resonance imaging in preoperative assessment of language areas: correlation with direct cortical stimulation. *Neurosurg.* 2003. V. 52. No. 6. P. 1335–1347.
  15. *Sair H. I., Agarwal S., Pillai J. J.* Application of resting state functional mr imaging to presurgical mapping. *Neuroimaging Clinics of North America.* 2017. V. 27. No. 4. P. 635–644.
  16. *Sharaev M., Smirnov A., Melnikova-Pitskhelauri T. et al.* Functional brain areas mapping in patients with glioma based on resting-state fmri data decomposition. *IEEE.* 2018. P. 292–298.
  17. *Smirnov A. S., Sharaev M. G., Melnikova-Pitskhelauri T. V. et al.* Resting state fMRI in pre-surgical brain mapping. Literature review. *Medical Visualization.* 2018. No. 5. P. 6–13.

### Сведения об авторах

**Смирнов Александр Сергеевич**, врач отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
 Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
 Тел.: +7 (926) 905-55-61. Электронная почта: alex.s.smirnof@gmail.com.  
 ORCID: 0000-0001-9313-6350

**Smirnov Aleksandr Sergeevich**, Neuroradiologist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods Federal State Autonomous Institution «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) 905-55-61. E-mail: alex.s.smirnof@gmail.com.  
 ORCID: 0000-0001-9313-6350

**Шараев Максим Геннадьевич**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Сколковского института науки и технологий.  
 Адрес: 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1.  
 Телефон: +79268110029. Электронная почта: m.sharaev@skoltech.ru  
 ORCID: 0000-0002-5670-2891

**Sharaev Maksim Gennadyevich**, Ph. D. Phys.-Math., Researcher of CDISE, Skolkovo Institute of Science and Technology.  
 Address: Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, 121205, Russia.  
 Phone number: +79268110029. E-mail: m.sharaev@skoltech.ru  
 ORCID: 0000-0002-5670-2891

**Мельникова-Пицхелаури Татьяна Викторовна**, кандидат биологических наук, ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. ак. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
 Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
 Электронная почта: MelPitz@nsi.ru  
 ORCID: 0000-0001-6760-9505

**Melnikova-Pitskhelauri Tatyana Viktorovna**, Ph. D. Biol., Lead. Engineer of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.

Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: MelPitz@nsi.ru  
ORCID: 0000-0001-6760-9505

**Погосбекян Эдуард Леонидович**, медицинский физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Телефон: +7. Электронная почта: epogobekyan@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-4803-6948

**Pogobekyan Eduard Leonidovich**, Med. Physicist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods of Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: epogobekyan@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-4803-6948

**Жуков Вадим Юрьевич**, кандидат медицинских наук, врач-нейрохирург 7 нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: vjukov@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-2523-3009

**Zhukov Vadim Yuryevich**, Ph. D. Med., Neurosurgeon of 7 Neurosurgery Department of Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: vjukov@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-2523-3009

**Буклина Светлана Борисовна**, доктор медицинских наук, врач-невропсихолог 3 нейрохирургического отделения ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: sbuklina@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-9451-3565

**Buklina Svetlana Borisovna**, M. D. Med., Neuropsychologist of 3 Neurosurgery Department of Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: sbuklina@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-9451-3565

**Огурцова Анна Анатольевна**, кандидат медицинских наук, врач-нейрофизиолог ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: aogurtsova@nsi.ru  
ORCID: 0000-0003-3595-2696

**Ogurtsova Anna Anatolevna**, Ph. D. Med., Neurophysiologist of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: aogurtsova@nsi.ru  
ORCID: 0000-0003-3595-2696.

**Бурнаев Евгений Владимирович**, кандидат физико-математических наук, профессор Сколковского института науки и технологий.  
Адрес: 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1.  
Электронная почта: e.burnaev@skoltech.ru  
ORCID: 0000-0001-8424-0690

**Burnaev Evgeniy Vladimirovich**, Ph. D. Phys.-Math., Professor of CDISE, Skolkovo Institute of Science and Technology.  
Address: Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, 121205, Russia.  
E-mail: e.burnaev@skoltech.ru  
ORCID: 0000-0001-8424-0690.

**Бернштейн Александр Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор Сколковского института науки и технологий.  
Адрес: 121205, г. Москва, территория инновационного центра «Сколково», Большой бульвар, д. 30, стр. 1.  
Электронная почта: a.bernstein@skoltech.ru  
ORCID: 0000-0002-5250-1849

**Bernstein Aleksandr Vladimirovich**, M. D. Phys.-Math., Professor of CDISE, Skolkovo Institute of Science and Technology.  
Address: Skolkovo Institute of Science and Technology, Bolshoy Boulevard 30, bld. 1, Moscow, 121205, Russia.  
E-mail: a.bernstein@skoltech.ru  
ORCID: 0000-0002-5250-1849.

**Пицхелаури Давид Ильич**, доктор медицинских наук, заведующий 7 нейрохирургическим отделением ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: dav@nsi.ru  
ORCID: 0000-0003-0374-7970

**Pitskhelauri David Ilich**, M. D. Med., Head of 7 Neurosurgery Department of Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: dav@nsi.ru  
ORCID: 0000-0003-0374-7970

**Корниенко Валерий Николаевич**, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, научный консультант, отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: kornienko@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-0487-1183

**Kornienko Valeriy Nikolaevich**, M. D. Med., Academician the Russian Academy of Sciences, Scie. Consultant of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: kornienko@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-0487-1183

**Пронин Игорь Николаевич**, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики, заместитель директора по науке ФГАУ «НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н. Н. Бурденко» Минздрава России.  
Адрес: 125047, г. Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16.  
Электронная почта: pronin@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-4480-0275

**Пронин Igor' Nikolaevich**, D. Sci. Med., Academician the Russian Academy of Sciences, Head of Department of X-ray and Radioisotope Diagnostic Methods, Federal State Autonomous Institution «N. N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery», Ministry of Healthcare of Russia.  
Address: 16, ul. 4th Tverskaya-Yamskaya, Moscow, 125047, Russia.  
E-mail: pronin@nsi.ru  
ORCID: 0000-0002-4480-0275

**Финансирование исследования и конфликт интересов.**

*Исследование финансировалось в рамках гранта РФФИ № 18-29-01032\18.  
Авторы заявляют, что данная работа, ее тема, предмет и содержание не затрагивают конкурирующих интересов.*