



6

Предоперационное картирование речевых и моторных функций с применением функциональной МРТ



Предоперационное (прехирургическое) картирование речевых и моторных функций в головном мозге — одна из основных областей применения функциональной МРТ в клинической практике. Предоперационное картирование проводят пациентам с опухолями головного мозга и пациентам с фармакорезистентной эпилепсией.

Целью предоперационного картирования является определение местоположения функционально значимых зон (ФЗЗ) (eloquent cortex) относительно области предполагаемого оперативного вмешательства. ФЗЗ — это области головного мозга, критически важные для протекания той или иной когнитивной либо моторной функции. Получение информации о локализации ФЗЗ крайне важно для нейрохирурга, чтобы соблюсти баланс между максимальной резекцией патологических тканей и минимальным ятрогенным повреждением ФЗЗ. В зависимости от локализации образования, подлежащего резекции, определяют перечень ФЗЗ, предположительно находящихся в зоне риска [1]. Чаще всего выполняют

картирование речевых и моторных функций [1, 2, 3], поскольку их нарушения приводят к значимому снижению качества жизни пациента. Злокачественные опухоли часто располагаются в лобных (24,6%), височных (17,6%) и теменных (10,4%) долях головного мозга [4], то есть вблизи или внутри речевых либо моторных ФЗЗ.

«Золотым стандартом» для определения местоположения ФЗЗ считают интраоперационное картирование с прямой электрической стимуляцией головного мозга [5, 6, 7]. При такой стимуляции первичной моторной коры регистрируется моторный вызванный потенциал с мышцы, поэтому для выявления моторных ФЗЗ пробуждение пациента во время операции не требуется.

Выявление речевых ФЗЗ возможно только во время операции с пробуждением и при оптимальном состоянии сознания пациента, поскольку ему необходимо выполнять речевые задачи во время стимуляции различных областей коры головного мозга. Критически важными считают те области, стимуляция которых вызывает кратковременные речевые нарушения (остановка или искажение речи). Интраоперационное картирование речевых областей может оказаться невозможным из-за сложностей достижения и поддержания оптимального состояния сознания пациента во время операции, а также из-за когнитивных нарушений пациента или его недостаточной психологической устойчивости [8]. Кроме того, для выявления речевых ФЗЗ, в отличие от моторных, чаще всего осуществляют не монополярную, а биполярную стимуляцию, связанную с более высоким риском развития эпилептического приступа [9, 10].

Недостатки и риски интраоперационного картирования обуславливают целесообразность предварительного неинвазивного картирования ФЗЗ с использованием функциональной МРТ и других методов, например магнитоэнцефалографии, транскраниальной магнитной стимуляции, что позволяет сократить время проведения интраоперационного картирования или получить данные, которые можно использовать для планирования нейрохирургического вмешательства в случае неудачной попытки интраоперационного картирования.

6.1 СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РЕЧЕВЫХ И МОТОРНЫХ ФУНКЦИЙ

В соответствии с современными представлениями нейронауки, высшие психические функции (ВПФ), например понимание речи, зрительное восприятие, функции программирования и контроля, обеспечиваются многоуровневыми, иерархически организованными и распределенными функциональными сетями головного мозга. Так, каждую ВПФ можно рассматривать как функциональную систему, состоящую из совокупности звеньев, каждое из которых вносит собственный вклад в реализацию ВПФ и обеспечивается работой определенных структур головного мозга (теория системной динамической локализации ВПФ Л.С. Выготского и А.Р. Лурии) [11]. Таким образом, при дефиците в функционировании любого звена ВПФ возможно ее нарушение, причем характер нарушений зависит от локализации поражения. Системную организацию ВПФ можно проиллюстрировать на примере модели мозговой организации речи у праворуких людей, построенной на основании данных отечественной афазиологии (**рис. 6.1**) [18, 19]. На рис. 6.1 не показаны правое полушарие, глубинные структуры и мозжечок, которые также вносят вклад в обеспечение речевых функций [12, 13]. С зарубежными моделями мозговой организации речи можно ознакомиться в [14].

Структура каждой ВПФ включает: (1) инвариантные звенья — постоянные, критически важные для реализации данной ВПФ; (2) вариативные звенья, за счет которых ВПФ может перестраиваться в зависимости от условий и способа выполнения задачи [11]. Например, для понимания речи собеседника в ситуации, когда рядом множество людей громко разговаривают, необходимо оттормаживание интерферирующих сообщений, а в спокойной обстановке этот дополнительный механизм для понимания речи не нужен [15].

ФЗЗ — это области мозга, обеспечивающие инвариантные звенья ВПФ, нарушение которых критическим образом влияет на эту функцию и приводит к невозможности ее корректного протекания. Возможности восстановления функций таких областей головного мозга после их пораже-

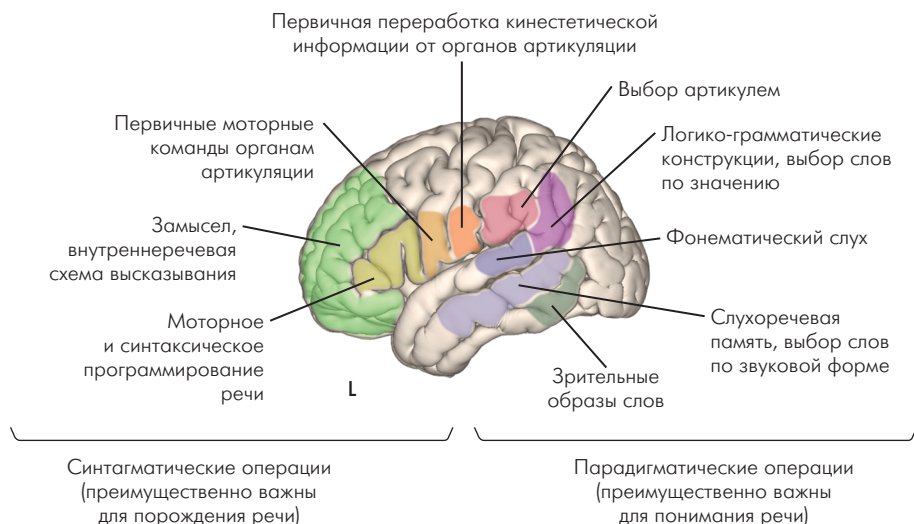


Рис. 6.1

Схематическое изображение модели мозговой организации речи по данным отечественной афазиологии. На рисунке не показаны правое полушарие, глубинные структуры и мозжечок, которые также вносят вклад в обеспечение речевых функций (иллюстрация предоставлена Я.Р. Паникратовой)

ния в значительной степени ограничены. Для порождения речи критически важна сохранность лобных компонентов речевой сети (нижняя лобная извилина), а для понимания речи — височных компонентов речевой сети (верхняя и средняя височные извилины). Так, в случае поражения нижней лобной извилины левого полушария у праворуких людей развивается эфферентная моторная афазия (афазия Брока), связанная с нарушением кинетического программирования (переключения между слогами и словами). Например, пациенты могут повторить изолированные звуки и артикуляторные движения, но не могут произнести слово [16, 17]. Поражения нижней лобной извилины левого полушария также могут приводить к переднему аграмматизму, при котором нарушается синтаксическое программирование речи. При грубой форме переднего аграмматизма высказывания пациента могут состоять только из одних существительных [16]. Поражение задней трети верхней височной извилины ле-

вого полушария у праворуких людей приводит к сенсорной афазии (афазии Вернике), ключевым нарушением которой являются трудности выбора фонем и звуковой формы слова: в остром периоде болезни пациент может воспринимать речь других людей как нечленораздельный шум [16, 17].

Тем не менее, для планирования стратегии нейрохирургического вмешательства общих представлений о функциональной анатомии головного мозга недостаточно. Термины «зона Брока» и «зона Вернике» многие исследователи считают некорректными, поскольку последние данные демонстрируют отсутствие как четкой анатомической отнесенности этих зон, так и однозначного понимания их функциональной роли [20, 21]. Даже у здоровых людей локализация и латерализация ВПФ, в том числе речи, характеризуются высокой вариативностью (рис. 6.2, рис. 6.3) [22, 23]. Вариативность локализации больше выражена для лобных компонентов речевой сети, чем для височных [22]. Атипичная латерализация речевых областей (их расположение в правом полушарии или билатерально) может наблюдаться не только у леворуких людей и амбидекстров (22–25%), но и у праворуких людей (5–7%) [24]. В случае поражения головного мозга индивидуальная вариативность возрастает за счет функциональной реорганизации в связи с адаптацией к развивающейся патологии [25, 26]. Этим обусловлена необходимость индивидуального картирования психических функций, в том числе речевых.

ФЗЗ для обеспечения движений конечностей располагаются в первичной моторной коре (предцентральная извилина) и первичной соматосенсорной коре (постцентральная извилина) в контралатеральном полушарии относительно конечности [30, 31, 32, 33]. Первичная моторная кора связана с обеспечением эфферентных звеньев движений (формированием команд, направляемых к скелетным мышцам), первичная соматосенсорная кора связана с обеспечением афферентных звеньев, то есть обработкой поступающей от конечностей сенсорной информации (тактильной, болевой, температурной, проприоцептивной). Поражение первичной моторной коры вызывает парез или паралич конечности [34,

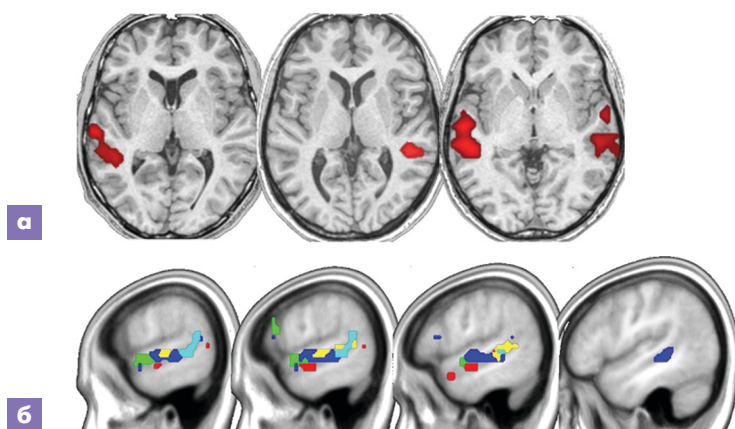


Рис. 6.2

Индивидуальная вариативность расположения височных компонентов речевой сети у здоровых праворуких людей. Показаны карты активации в задаче, предполагающей семантическую обработку речи: прослушивание аудиокниги против прослушивания той же аудиозаписи, но проигранной в обратном направлении. Групповая карта доступна по ссылке <https://identifiers.org/neurovault.collection:13137>. (а) Вариативность латерализации: у первого участника исследования височный компонент речевой сети расположен в левом полушарии, у второго — в правом полушарии, у третьего — билатерально. (б) Вариативность локализации активации в левом полушарии. Разными цветами (зеленый, красный, синий, желтый, голубой) закодирована активация 5 разных участников (иллюстрация предоставлена Я.Р. Паникратовой)

35, 36]. При поражении первичной соматосенсорной коры происходит снижение чувствительности (тактильной, болевой, температурной), а также утрачивается чувство позы [35, 36]. Первичные области коры организованы по соматотопическому принципу, описанному еще в работах У. Пенфилда [37]. В частности, корковые представления нижних конечностей расположены в верхних частях первичной моторной коры и соматосенсорной коры, представления верхних конечностей располагаются в нижних частях первичной моторной коры и соматосенсорной коры. Тем не менее, определение на изображении структурной МРТ корковых представлений верхней конечности и нижней конечности по анатомическим ориентирам может быть затруднительным и ненадежным [2, 38]. Кроме того, из-

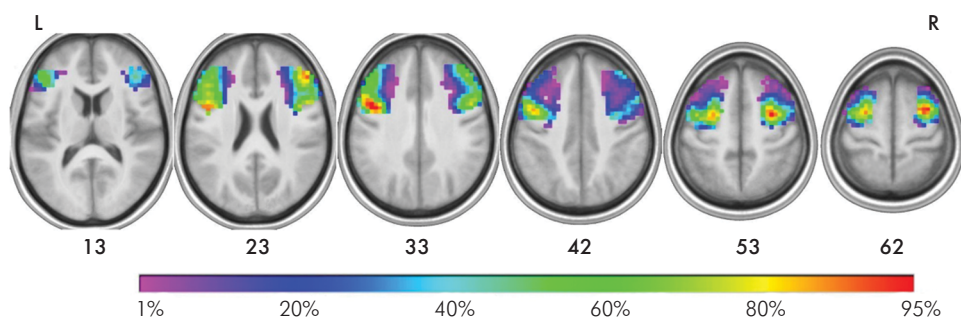


Рис. 6.3

Вероятностная карта активации дорсолатеральной префронтальной коры при оценке правильности решения арифметических примеров. Цветовая шкала отражает долю участников исследования, у которых наблюдалась надпороговая активация в данном вокселе. Карта иллюстрирует индивидуальную вариативность расположения дорсолатеральной префронтальной коры (функциональной области, ключевой для осуществления регуляторных функций) у 50 здоровых людей (46 праворуких, 1 леворукий, 3 амбидекстры). Цифры около среза соответствуют его номеру (иллюстрация предоставлена Я.Р. Паникратовой)

за развития патологических процессов у пациентов может произойти структурно-функциональная реорганизация моторных функций [39], поэтому для их картирования часто используют функциональную МРТ.

Цели индивидуального картирования речевых функций обычно включают определение локализации и латерализации ФЗЗ, связанных с пониманием речи, порождением речи и речевой артикуляцией. При предоперационном картировании моторных функций оценивается локализация корковых представительств верхней конечности и нижней конечности.

6.2 Задачи, используемые для картирования речевых и моторных функций

В настоящее время уже разработан большой арсенал речевых задач для функциональной МРТ. Наиболее часто используемые и успешно рекомендовавшие себя задачи перечислены в табл. 6.1. В табл. 6.1 задачи разделены на 2 группы: (1) предназначенные для картирования лобных компонентов речевой сети; (2) предназначенные

ТАБЛИЦА 6.1 Задачи для картирования речевых функций [14]

Задачи для картирования лобных компонентов речевой сети	Задачи для картирования височных компонентов речевой сети
Завершение предложений [40], в том числе в соответствии с картинкой [41] Называние слов, начинающихся на заданную букву [40] Называние слов, относящихся к заданной категории, например «животные» [42, 43, 44] Называние предметов по картинке [40] Называние антонимов к предъявленным словам [40] Называние действий, которые можно выполнить с предметом, изображенным на картинке или обозначенным словом [42, 47, 50, 51, 52, 53] Актуализация слова по определению [42, 43, 49] Ответы на прямые вопросы, например «Какого цвета трава?» [56]	Определение, рифмуются ли слова [40] Прослушивание фрагмента аудиокниги [40] Прослушивание предложений [45] Чтение отдельных слов, в том числе написанных задом наперед [46, 47, 48] Составление слов из букв [46, 47, 49] Определение, связаны ли слова по значению или относятся ли они к одной и той же категории (задачи семантического решения) [49, 53, 54] Проверка соответствия утверждений действительности [55] Выбор картинки, соответствующей предложению [41] Просмотр фильма, содержащего диалоги [57]

для картирования височных компонентов речевой сети. Однако многие речевые задачи, взятые по отдельности, могут активировать и лобные, и височные компоненты речевой сети, особенно на групповом уровне (**рис. 6.4**) [27, 28]. Тем не менее, задачи, предполагающие понимание речи, обладают большей надежностью для выявления височных компонентов речевой сети на индивидуальном уровне (у одного человека) (см. рис. 6.4б), а задачи для оценки порождения речи — для выявления лобных компонентов речевой сети. В связи с этим для картирования функций понимания и порождения речи у конкретного пациента целесообразно использовать различные специализированные задачи.

В настоящее время предложены речевые задачи на русском языке в различном состоянии проработки: перечисление месяцев года в обратном порядке [58], называние предметов по картинкам [59, 60, 61], называние действий по картинкам [62], подбор глагола-ассоциации к существительному [60], называние действия, которое можно совершить с предметом на картинке [63], чтение

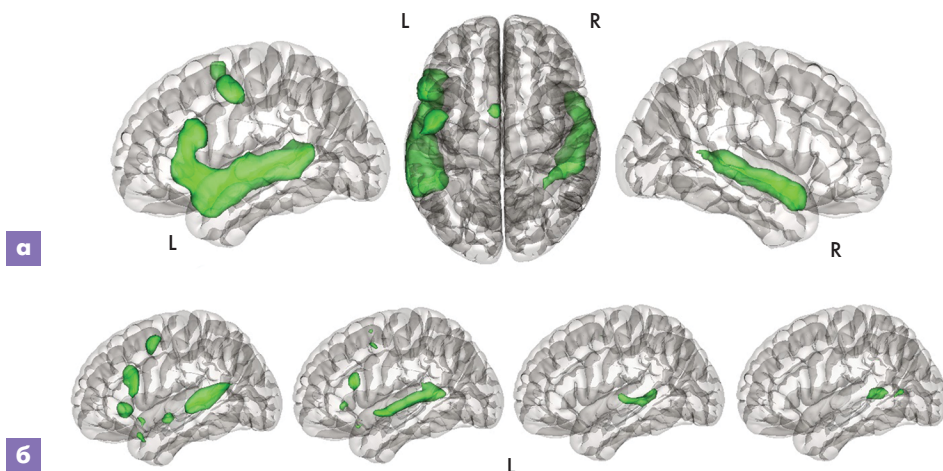


Рис. 6.4

Карты активации головного мозга при прослушивании аудиокниги по сравнению с прослушиванием той же аудиозаписи, но проигранной в обратном направлении (семантическая обработка речи). **(а)** Групповая карта активации, рассчитанная на основании данных 53 здоровых праворуких людей (доступна по ссылке <https://identifiers.org/neurovault.collection:13137>). **(б)** Индивидуальные карты активации в левом полушарии 4 участников исследования. Статистический порог на всех картах: $p_{FWE} < 0,05$ (иллюстрация предоставлена Я.Р. Паникратовой)

предложений [64, 65], комбинированное чтение и завершение предложений [66, 67, 68], семантическое решение с двигательным ответом путем нажатия на кнопку [69], прослушивание аудиокниги с различными задачами контрольного условия [1, 70], вербальные ассоциации на заданную букву [1].

Задачи для картирования моторных функций более простые и предполагают активные движения рукой или ногой (например, правой или левой в разных блоках). В частности, для картирования корковых представительства верхних конечностей используют задачу поочередного соприкосновения подушечки большого пальца руки с подушечками всех других пальцев руки и выпрямления кисти [71] или задачу поочередного соприкосновения большого пальца руки с каждым пальцем [38, 39], или задачу сжатия кисти в кулак и ее выпрямления [72], или зада-

чу отведения отдельных пальцев руки [39]. Для картирования корковых представительств нижней конечности используют задачу поочередного сгибания и разгибания стопы [71, 73] или задачу поочередного сгибания и разгибания пальцев ног [74].

В последнее время активно обсуждается целесообразность применения функциональной МРТ покоя для предоперационного картирования речевых и моторных ФЗЗ. Полученные результаты неоднозначны: во многих исследованиях обнаруживается недостаточная согласованность данных функциональной МРТ, связанной с задачей, и данных функциональной МРТ покоя. Например, при картировании речевых функций пересечение карт активации и функциональной связанности может составлять 20–40% и менее, а конкордантность определения латерализации данными методами — 20–75% [14]. В связи с этим функциональную МРТ покоя в предоперационном картировании пока следует использовать с осторожностью [2, 3].

6.3 ПРОБЛЕМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МРТ В ПРЕДОПЕРАЦИОННОМ КАРТИРОВАНИИ

6.3.1 Выявление критически важных звеньев функциональной сети

Функциональная МРТ позволяет выявить функциональную сеть, участвующую в выполнении задачи и включающую компоненты, соответствующие как инвариантным, так и вариативным звеньям ВПФ [15]. Компоненты, соответствующие вариативным звеньям ВПФ, связаны с особенностями конкретной задачи или способом ее выполнения [15]. Определить, какие из компонентов функциональной сети соответствуют именно инвариантным звеньям, сложно, так как наличие локальной активации не свидетельствует о том, что она критически необходима для реализации функции (см. подраздел 2.2.5). Эта проблема в большей степени релевантна для картирования речевых функций, чем для картирования моторных функций.

Для выявления компонентов сети, соответствующих инвариантным звеньям, можно использовать комбинированный анализ задач. Па-

циенту предлагается выполнить несколько задач для оценки понимания и порождения речи с предъявлением материала в различных модальностях (зрительной и слуховой). Предполагается, что компоненты речевой сети, соответствующие инвариантным звеньям речевой системы, будут присутствовать на всех картах активации и могут быть определены как области пересечения карт активации в разных задачах [70, 75, 76]. Области пересечения могут быть оценены как визуально, так и количественно с использованием статистического метода анализа объединений (conjunction analysis). Комбинированный анализ позволяет повысить надежность выявления индивидуальной латерализации и локализации речевых областей [77, 78], однако его оптимальное применение, по-видимому, предполагает раздельную оценку для лобных и височных компонентов речевой системы [14].

Другой способ объединения данных из разных задач заключается в проведении «супер-проб» с блочным дизайном. Разные блоки соответствуют различным речевым задачам (например, называние слов на определенную букву, завершение предложений, актуализация слова по определению) и задачам контрольного условия (движения пальцев, просмотр узоров) [79]. На основании статистической обработки полученных данных вычисляется единая карта активации головного мозга во всех речевых задачах по сравнению с задачами контрольного условия без выделения специфического вклада каждой речевой задачи.

6.3.2 Контроль корректности выполнения речевых задач пациентом

Еще одна проблема заключается в том, что многие речевые задачи пациент должен выполнить, проговаривая слова про себя, а не вслух (в основном с целью минимизации артефактов движения головы). Такой подход оправдан высоким сходством активации у одного и того же человека при выполнении речевых задач вслух и про себя, однако применение этого подхода вызывает критику, поскольку в этом случае корректность выполнения задачи не может быть проконтролирована. Возможным решением данной проблемы может

быть применение разреженного протокола сканирования (см. подраздел 2.2.4) [80] или предварительное обучение пациента произносить слова с минимальными движениями челюсти и головы [81].

6.3.3 Подбор оптимального уровня сложности задач основного и контрольного условий

Отдельной проблемой для картирования речевых и моторных функций является подбор оптимального уровня сложности задач основного и контрольного условий. Если у пациента наблюдаются выраженные речевые нарушения, другие когнитивные или двигательные нарушения, выполнение предложенной задачи может быть ему недоступно, что приведет к отсутствию надпороговой активации. Если задача в целом доступна пациенту, но ее выполнение вызывает сложности, могут быть обнаружены дополнительные области активации. При этом снижение сложности задачи основного условия или подбор более простой задачи контрольного условия связаны со снижением специфичности полученной активации для исследуемого психического процесса (см. подраздел 2.2.1).

В связи с указанными трудностями сейчас разрабатывают подходы, позволяющие подобрать и/или адаптировать задачи для конкретного пациента с учетом состояния его когнитивных и моторных функций. В качестве примера можно рассмотреть подход, разработанный в 2010–2017 гг. в лаборатории функциональной МРТ головного мозга (заведующая Е.В. Печенкова) Центра лучевой диагностики (заведующий В.Е. Сеницын) Федерального государственного автономного учреждения «Лечебно-реабилитационный центр» Минздрава РФ. Для выбора и/или адаптации активирующих задач для функциональной МРТ и задач контрольного условия использовали результаты предварительного краткого нейропсихологического обследования [1].

Так, для определения локализации ФЗЗ, связанных с движениями верхних конечностей, в зависимости от степени выраженности двигательного дефицита могли быть выбраны следующие задачи: активное попеременное движение кистями (минимальный дефицит), активное одновре-

менное движение кистями (трудности переключения), пассивное движение (синкинезии или вялый парез) или тактильная стимуляция (спастический парез) [82].

В нейропсихологическом обследовании перед картированием речевых функций оценивали тип и степень выраженности афазии, а также состояние функций фонематического анализа и синтеза, слухоречевой памяти, номинации, программирования и контроля, поддержания оптимального уровня бодрствования [82]. Если у пациента не было выявлено выраженных речевых и других когнитивных нарушений, использовали стандартный набор речевых задач с последующим выявлением областей пересечения активации в данных задачах. Такой стандартный набор речевых задач включал чтение предложений [64, 65], проговаривание про себя действий, которые можно совершить с предметом на картинке [63], прослушивание аудиокниги [1, 70]. Если у пациента были обнаружены выраженные нарушения речи и других когнитивных функций, при выборе и адаптации задач соблюдали баланс таким образом, чтобы задачи были доступны для пациента, но обладали достаточным уровнем сложности для определения локализации ФЗЗ и оценки латерализации речи. Так, при картировании понимания речи у пациента с дефицитом фонематического анализа и синтеза и/или слухоречевой памяти задача контрольного условия могла быть заменена на прослушивание музыки или на отсутствие слуховой стимуляции (в стандартном варианте — прослушивание проигранной в обратном направлении аудиозаписи речи). При наличии регуляторного дефицита, трудностей вхождения в контакт с исследователем и страха прохождения обследования пациенту предлагали слушать речь родственника, стоящего рядом, и сравнивали полученные в этих условиях данные с данными, зарегистрированными при отсутствии слуховой стимуляции [82].

6.3.4 Искажения BOLD-сигнала и пространственная ошибка карт активации

Объемные образования в головном мозге влияют на метаболизм и кровообращение в близлежащих тканях, что приводит к отсутствию, ослаб-

лению или искажению гемодинамического ответа при функциональной МРТ [3, 83, 84]. Предсказать конкретные нарушения нейрососудистой связи у того или иного пациента обычно невозможно [14].

Кроме того, карты активации по данным функциональной МРТ могут расходиться с результатами интраоперационного картирования на 5–20 мм [85, 86] вследствие изменения внутричерепного давления и деформации головного мозга после краниотомии. Другой причиной расхождения могут быть сосудистые артефакты на изображениях функциональной МРТ (см. подраздел 4.2.4).

Результаты функциональной МРТ в значительной степени зависят от выбранной задачи (см. подраздел 6.3.1) и статистического порога при обработке данных, а результаты совмещения данных функциональной МРТ и интраоперационного картирования могут различаться в зависимости от способа их совмещения.

Несмотря на эти ограничения, метод функциональной МРТ широко применяют в предоперационном картировании речевых и моторных функций. Однако для повышения надежности данных о локализации и латерализации ФЗЗ необходима перекрестная валидизация результатов функциональной МРТ данными, полученными с использованием других релевантных методов — в первую очередь прямой электрической стимуляции головного мозга во время операции, а также пробы Вада, транскраниальной магнитной стимуляции и магнитоэнцефалографии [87, 88].

Литература

1. Власова Р.М., Печенкова Е.В., Сеницын В.Е., Степанян М.А. Сочетание функциональной магнитнорезонансной томографии и нейропсихологического обследования при предоперационной диагностике в нейрохирургии опухолей головного мозга. Кубанский научный медицинский вестник, 2010, (6), 38–43.
2. Lakhani D.A., Sabsevit D.S., Chaichana K.L., Quinones-Hinojosa A., Middlebrooks E.H. Current State of Functional MRI in the Presurgical Planning of Brain Tumors. Radiol Imaging Cancer, 2023, 5(6), e230078. doi:10.1148/rycan.230078
3. Leone A., Carbone F., Spetzger U., Vajkoczy P., Raffa G., Angileri F., Germano A., Engelhardt M., Picht T., Colamaria A., Rosenstock T. Preoperative mapping techniques

- for brain tumor surgery: a systematic review. *Front Oncol*, 2024, 14, 1481430. doi:10.3389/fonc.2024.1481430
4. Ostrom Q.T., Price M., Neff C., Cioffi G., Waite K.A., Kruchko C., Barnholtz-Sloan J.S. CBTRUS Statistical Report: Primary Brain and Other Central Nervous System Tumors Diagnosed in the United States in 2016–2020. *Neuro Oncol*, 2023, 25(12 Suppl 2), iv1–iv99. doi:10.1093/neuonc/noad149
 5. Szelenyi A., Bello L., Duffau H., Fava E., Feigl G.C., Galanda M., Neuloh G., Signorelli F., Sala F. Intraoperative electrical stimulation in awake craniotomy: methodological aspects of current practice. *Neurosurg Focus*, 2010, 28(2), E7. doi:10.3171/2009.12.FOCUS09237
 6. Dragoy O., Chrabaszcz A., Tolkacheva V., Buklina S. Russian Intraoperative Naming Test: a Standardized Tool to Map Noun and Verb Production during Awake Neurosurgeries. *The Russian Journal of Cognitive Science*, 2016, 3(4), 4–25.
 7. Ritaccio A.L., Brunner P., Schalk G. Electrical Stimulation Mapping of the Brain: Basic Principles and Emerging Alternatives. *J Clin Neurophysiol*, 2018, 35(2), 86–97. doi:10.1097/WNP.0000000000000440
 8. Roland J.L., Hacker C.D., Leuthardt E.C. A Review of Passive Brain Mapping Techniques in Neurological Surgery. *Neurosurgery*, 2020, 88(1), 15–24. doi:10.1093/neuros/nyaa361
 9. Riva M., Fava E., Gallucci M., Comi A., Casarotti A., Alfiero T., Raneri F.A., Pessina F., Bello L. Monopolar high-frequency language mapping: can it help in the surgical management of gliomas? A comparative clinical study. *J Neurosurg*, 2016, 124(5), 1479–1489. doi:10.3171/2015.4.JNS14333
 10. Verst S.M., de Aguiar P.H.P., Joaquim M.A.S., Vieira V.G., Sucena A.B.C., Maldaun M.V.C. Monopolar 250–500Hz language mapping: Results of 41 patients. *Clin Neurophysiol Pract*, 2019, 4, 1–8. doi:10.1016/j.cnp.2018.11.002
 11. Лурия А.Р. Высшие корковые функции человека и их нарушения при локальных поражениях мозга. М.: Издательство Московского университета, 1962.
 12. Ахутина Т.В. Роль правого полушария в построении текста. *Психолінгвістика*, 2009, (3), 10–28.
 13. Vlasova R.M., Panikratova Y.R., Pechenkova E.V. Systematic Review and Meta-analysis of Language Symptoms due to Cerebellar Injury. *Cerebellum*, 2023, 22(6), 1274–1286. doi:10.1007/s12311-022-01482-5
 14. Печенкова Е.В., Паникратова Я.Р., Мершина Е.А., Власова Р.М. Прехирургическое картирование речевых зон коры головного мозга с помощью фМРТ: актуальное состояние и тенденции. *Медицинская визуализация*, 2022, 26(1), 48–69. doi:10.24835/1607-0763-1094
 15. Паникратова Я.Р., Власова Р.М., Лебедева И.С., Сеницын В.Е., Печенкова Е.В. Возможности методов нейровизуализации и нейростимуляции для развития теории системной динамической локализации высших психических функций. *Культурно-историческая психология*, 2022, 18(3), 70–80. doi:10.17759/chp.2022180310
 16. Akhutina T. Luria's classification of aphasias and its theoretical basis. *Aphasiology*, 2015, 30(8), 878–897. doi:10.1080/02687038.2015.1070950

17. Лурия А.Р. Травматическая афазия. Клиника, семиотика и восстановительная терапия. М.: Издательство Академии медицинских наук СССР, 1947.
18. Ахутина Т.В. Вместо заключения: Модель порождения речи Леонтьева–Рябовой: 1967–2005 // Нейролингвистический анализ лексики, семантики и прагматики. М.: Языки славянской культуры, 2014. С. 395–417.
19. Паникратова Я.Р., Власова Р.М. Задача для локализации лобных и височных компонентов речевой сети мозга с помощью фМРТ: разработка стимулов и результаты пилотного поведенческого исследования // Е.В. Печенкова, М.В. Фаликман, А.Я. Койфман (Ред.), Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции 25–26 июня 2025 г. М.: ООО «Буки Веди», Московский институт психоанализа, 2025. С. 655–660.
20. Catani M., Jones D.K., ffytche D.H. Perisylvian language networks of the human brain. *Ann Neurol*, 2005, 57(1), 8–16. doi:10.1002/ana.20319
21. Tremblay P., Dick A.S. Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain Lang*, 2016, 162, 60–71. doi:10.1016/j.bandl.2016.08.004
22. Lipkin B., Tuckute G., Affourtit J., Small H., Mineroff Z., Kean H., Jouravlev O., Rakocevic L., Pritchett B., Siegelman M., Hoefflin C., Pongos A., Blank I.A., Struhl M.K., Ivanova A., Shannon S., Sathe A., Hoffmann M., Nieto-Castanon A., Fedorenko E. Probabilistic atlas for the language network based on precision fMRI data from >800 individuals. *Sci Data*, 2022, 9(1), 529. doi:10.1038/s41597-022-01645-3
23. Fedorenko E., Kanwisher N. Neuroimaging of Language: Why Hasn't a Clearer Picture Emerged? *Language and Linguistics Compass*, 2009, 3(4), 839–865. doi:10.1111/j.1749-818X.2009.00143.x
24. Nenert R., Allendorfer J.B., Martin A.M., Banks C., Vannest J., Holland S.K., Szaflarski J.P. Age-related language lateralization assessed by fMRI: The effects of sex and handedness. *Brain Res*, 2017, 1674, 20–35. doi:10.1016/j.brainres.2017.08.021
25. Ojemann G.A. Individual variability in cortical localization of language. *J Neurosurg*, 1979, 50(2), 164–169. doi:10.3171/jns.1979.50.2.0164
26. Ding J.R., Zhu F., Hua B., Xiong X., Wen Y., Ding Z., Thompson P.M. Presurgical localization and spatial shift of resting state networks in patients with brain metastases. *Brain Imaging Behav*, 2019, 13(2), 408–420. doi:10.1007/s11682-018-9864-6
27. Panikratova Y., Egorova M., Vlasova R., Pechenkova E., Makovskaya L., Bazhenova D., Rumshiskaya A., Litvinova L., Meršina E., Sinitsyn V. 2023. Group activation maps for an fMRI language localizer (listening to speech vs reversed speech) <https://identifiers.org/neurovault.collection:13137>.
28. Panikratova Y.R., Lebedeva I.S., Akhutina T.V., Tikhonov D.V., Kaleda V.G., Vlasova R.M. Executive control of language in schizophrenia patients with history of auditory verbal hallucinations: A neuropsychological and resting-state fMRI study. *Schizophr Res*, 2023, 262, 201–210. doi:10.1016/j.schres.2023.10.026

29. Panikratova Y.R., Vlasova R.M., Akhutina T.V., Korneev A.A., Sinitsyn V.E., Pechenkova E.V. Functional connectivity of the dorsolateral prefrontal cortex contributes to different components of executive functions. *International Journal of Psychophysiology*, 2020, 151, 70–79. doi:10.1016/j.ijpsycho.2020.02.013
30. Hlustik P., Solodkin A., Gullapalli R.P., Noll D.C., Small S.L. Somatotopy in human primary motor and somatosensory hand representations revisited. *Cereb Cortex*, 2001, 11(4), 312–321. doi:10.1093/cercor/11.4.312
31. Siero J.C.W., Hermes D., Hoogduin H., Luijten P.R., Ramsey N.F., Petridou N. BOLD matches neuronal activity at the mm scale: A combined 7T fMRI and ECoG study in human sensorimotor cortex. *Neuroimage*, 2014, 101, 177–184. doi:10.1016/j.neuroimage.2014.07.002
32. Akselrod M., Martuzzi R., Serino A., van der Zwaag W., Gassert R., Blanke O. Anatomical and functional properties of the foot and leg representation in areas 3b, 1 and 2 of primary somatosensory cortex in humans: A 7T fMRI study. *Neuroimage*, 2017, 159, 473–487. doi:10.1016/j.neuroimage.2017.06.021
33. Nakata H., Domoto R., Mizuguchi N., Sakamoto K., Kanosue K. Negative BOLD responses during hand and foot movements: An fMRI study. *PLoS One*, 2019, 14(4), e0215736. doi:10.1371/journal.pone.0215736
34. Schieber M.H. Constraints on somatotopic organization in the primary motor cortex. *J Neurophysiol*, 2001, 86(5), 2125–2143. doi:10.1152/jn.2001.86.5.2125
35. Буклина С.Б. Нейропсихология в историях реальных больных. М.: МЕДпресс-информ, 2025.
36. Бер М., Фротшер М. Топический диагноз в неврологии по Петеру Дуусу: анатомия, физиология, клиника (пер. с англ. под ред. О. С. Левина). 3-е изд. на русском языке. М.: Практическая медицина, 2018.
37. Penfield W., Boldrey E. Somatic Motor and Sensory Representation in the Cerebral Cortex of Man as Studied by Electrical Stimulation. *Brain*, 1937, 60(4), 389–443. doi:10.1093/brain/60.4.389
38. Hou B.L., Bhatia S., Carpenter J.S. Quantitative comparisons on hand motor functional areas determined by resting state and task BOLD fMRI and anatomical MRI for pre-surgical planning of patients with brain tumors. *Neuroimage Clin*, 2016, 11, 378–387. doi:10.1016/j.nicl.2016.03.003
39. Ciavarro M., Grande E., Pavone L., Bevacqua G., De Angelis M., di Russo P., Morace R., Committer G., Grillea G., Bartolo M., Paolini S., Esposito V. Pre-surgical fMRI Localization of the Hand Motor Cortex in Brain Tumors: Comparison Between Finger Tapping Task and a New Visual-Triggered Finger Movement Task. *Front Neurol*, 2021, 12, 658025. doi:10.3389/fneur.2021.658025
40. Black D.F., Vachha B., Mian A., Faro S.H., Maheshwari M., Sair H.I., Petrella J.R., Pillai J.J., Welker K. American Society of Functional Neuroradiology-Recommended fMRI Paradigm Algorithms for Presurgical Language Assessment. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2017, 38(10), E65–E73. doi:10.3174/ajnr.A5345
41. Polczynska M., Japardi K., Curtiss S., Moody T., Benjamin C., Cho A., Vigil C., Kuhn T., Jones M., Bookheimer S. Improving

- language mapping in clinical fMRI through assessment of grammar. *Neuroimage Clin*, 2017, 15, 415–427. doi:10.1016/j.nicl.2017.05.021
42. Barnett A., Marty-Dugas J., McAndrews M.P. Advantages of sentence-level fMRI language tasks in presurgical language mapping for temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Behav*, 2014, 32, 114–120. doi:10.1016/j.yebeh.2014.01.010
 43. de Guibert C., Maumet C., Ferre J.C., Jannin P., Biraben A., Allaire C., Barillot C., Le Rumeur E. FMRI language mapping in children: a panel of language tasks using visual and auditory stimulation without reading or metalinguistic requirements. *Neuroimage*, 2010, 51(2), 897–909. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.02.054
 44. Mohtasib R.S., Alghamdi J.S., Baz S.M., Aljoudi H.F., Masawi A.M., Jobeir A.A. Developing fMRI protocol for clinical use Comparison of 6 Arabic paradigms for brain language mapping in native Arabic speakers. *Neurosciences (Riyadh)*, 2021, 26(1), 45–55. doi:10.17712/nsj.2021.1.20200012
 45. Zaca D., Nickerson J.P., Deib G., Pillai J.J. Effectiveness of four different clinical fMRI paradigms for preoperative regional determination of language lateralization in patients with brain tumors. *Neuroradiology*, 2012, 54(9), 1015–1025. doi:10.1007/s00234-012-1056-2
 46. Mahdavi A., Houshmand S., Oghabian M.A., Zarei M., Mahdavi A., Shoar M.H., Ghanaati H. Developing optimized fMRI protocol for clinical use: comparison of different language paradigms. *J Magn Reson Imaging*, 2011, 34(2), 413–419. doi:10.1002/jmri.22604
 47. Mahdavi A., Azar R., Shoar M.H., Hooshmand S., Mahdavi A., Kharrazi H.H. Functional MRI in clinical practice: Assessment of language and motor for pre-surgical planning. *Neuroradiol J*, 2015, 28(5), 468–473. doi:10.1177/1971400915609343
 48. Gould L., Mickleborough M.J., Wu A., Tellez J., Ekstrand C., Lorentz E., Ellchuk T., Babyn P., Borowsky R. Presurgical language mapping in epilepsy: Using fMRI of reading to identify functional reorganization in a patient with long-standing temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Behav Case Rep*, 2016, 5, 6–10. doi:10.1016/j.ebcr.2015.10.003
 49. Alemi R., Batouli S.A.H., Behzad E., Ebrahimipoor M., Oghabian M.A. Not single brain areas but a network is involved in language: Applications in presurgical planning. *Clin Neurol Neurosurg*, 2018, 165, 116–128. doi:10.1016/j.clineuro.2018.01.009
 50. Sanjuan A., Bustamante J.C., Forn C., Ventura-Campos N., Barros-Loscertales A., Martinez J.C., Villanueva V., Avila C. Comparison of two fMRI tasks for the evaluation of the expressive language function. *Neuroradiology*, 2010, 52(5), 407–415. doi:10.1007/s00234-010-0667-8
 51. Mohtasib R.S., Alghamdi J.S., Baz S.M., Aljoudi H.F., Masawi A.M., Jobeir A.A. Developing fMRI protocol for clinical use. Comparison of 6 Arabic paradigms for brain language mapping in native Arabic speakers. *Neurosciences (Riyadh)*, 2021, 26(1), 45–55. doi:10.17712/nsj.2021.1.20200012
 52. Власова Р.М. Мозговые механизмы номинативной функции речи: нейропсихологический

- и нейровизуализационный подход: дисс. ... канд. психол. наук. Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, 2013.
53. Thakkar I., Arrano-Carrasco L., Cortes-Rivera B., Zunino-Pesce R., Mery-Munoz F., Rodriguez-Fernandez M., Smits M., Mendez-Orellana C. Alternative language paradigms for functional magnetic resonance imaging as presurgical tools for inducing crossed cerebro-cerebellar language activations in brain tumor patients. *Eur Radiol*, 2021. doi:10.1007/s00330-021-08137-9
54. Wang A., Peters T.M., de Ribaupierre S., Mirsattari S.M. Functional magnetic resonance imaging for language mapping in temporal lobe epilepsy. *Epilepsy Res Treat*, 2012, 2012, 198183. doi:10.1155/2012/198183
55. Sanjuan A., Forn C., Ventura-Campos N., Rodriguez-Pujadas A., Garcia-Porcar M., Belloch V., Villanueva V., Avila C. The sentence verification task: a reliable fMRI protocol for mapping receptive language in individual subjects. *Eur Radiol*, 2010, 20(10), 2432–2438. doi:10.1007/s00330-010-1814-7
56. Unadkat P., Fumagalli L., Rigolo L., Vangel M.G., Young G.S., Huang R., Mukundan S., Jr., Golby A., Tie Y. Functional MRI Task Comparison for Language Mapping in Neurosurgical Patients. *J Neuroimaging*, 2019, 29(3), 348–356. doi:10.1111/jon.12597
57. Tie Y., Rigolo L., Ozdemir Ovalioglu A., Olubiyi O., Doolin K.L., Mukundan S., Jr., Golby A.J. A New Paradigm for Individual Subject Language Mapping: Movie-Watching fMRI. *J Neuroimaging*, 2015, 25(5), 710–720. doi:10.1111/jon.12251
58. Буклина С.Б., Подопрigора А.Е., Пронин И.Н., Болдырева Г.Н., Бондаренко А.А., Пяшина Д.В., Фадеева Л.М., Корниенко В.Н. фМРТ-исследования доминантности полушария по речи у больных с опухолями головного мозга. *Международный симпозиум по нейроимиджингу: фундаментальные исследования и клиническая практика. М.: МГПИИУ, 2012. С. 52–55.*
59. Vlasova R.M., Sinitsyn V.E., Pechenkova E.V. The Effect of Word Frequency on the Brain Correlates of Object Naming in Russian. *The Russian Journal of Cognitive Science*, 2015, 2(1), 24–40.
60. Кремнева Е.И., Коновалов Р.Н., Кротенкова М.В., Кадыков А.С., Боголепова И.Н., Белопасова А.В. Картирование речевых структур головного мозга у здоровых людей с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии. *Лучевая диагностика и терапия*, 2012, (2 (3)), 65–72.
61. Коробкова Л.А., Власова Р.М., Синицын В.Е., Печенкова Е.В. Номинация или артикуляция: фМРТ-исследование // Е.В. Печенкова, М.В. Фаликман (Ред.), *Когнитивная наука в Москве: новые исследования. М.: Буки Веди, ИППиП, 2015. С. 190–196.*
62. Драгой О.В., Власова Р.М., Козинцева Е.Г., Малютина С.А., Акинина Ю.С., Петрушевский А.Г., Федина О.Н., Гутырчик Е.Ф., Иванова М.В. фМРТ-исследование названия действий при афазии // Е.В. Печенкова, М.В. Фаликман (Ред.). *Когнитивная наука в Москве: новые исследования. М.: Буки Веди, ИППиП, 2015. С. 119–124.*

63. Власова Р.М., Печенкова Е.В., Ахутина Т.В., Синицын В.Е., Ситников А.Р. Называние действий по картинкам: фМРТ-исследование. Международный симпозиум по нейроимиджингу: фундаментальные исследования и клиническая практика. М.: МГППУ, 2012. С. 58–60.
64. Игнатъев Г.А., Власова Р.М., Акинина Ю.С., Завьялова В.В., Л. У.В., Иванова М.В., Драгой О.В. фМРТ-исследование чтения предложений: эффект контрольного условия // Е.В. Печенкова, М.В. Фаликман (Ред.), Когнитивная наука в Москве: новые исследования. М.: Буки Веди, ИПШП, 2015. С. 158–164.
65. Печенкова Е.В., Власова Р.М., Новикова М.В., Фаликман М.В., Синицын В.Е. Чтение предложений как активирующее задание для функциональной МРТ головного мозга. Российский электронный журнал лучевой диагностики, 2012, 2(2), 406–407.
66. Белопасова А.В., Кадыков А.С., Коновалов Р.Н., Кремнева Е.И. Организация нейрональной речевой системы у здоровых лиц и ее реорганизация у пациентов с постинсультной афазией. Анналы клинической и экспериментальной неврологии, 2013, 7(1), 25–30.
67. Власова Р.М., Печенкова Е.В., Ахутина Т.В., Синицын В.Е. Структурно-функциональная организация использования глаголов и существительных в зависимости от стратегии их актуализации. Вопросы психологии, 2012, (4), 128–138.
68. Большина Т.А., Малютин С.А., Завьялова В.В., Игнатъев Г.А., Власова Р.М., Ушаков В.Л., Иванова М.В., Драгой О.В. Русскоязычная фМРТ-парадигма для локализации речевых зон в мозге // Ю.И. Александров, К.В. Анохин (Ред.). Седьмая международная конференция по когнитивной науке. М.: Институт психологии РАН, 2016. С. 163–164.
69. Купцова С.В., Власова Р.М., Драгой О.В., Иванова М.В., Малютин С.А., Петрушевский А.Г., Федина О.Н., Гутырчик Е.Ф. Особенности реорганизации речевых зон мозга у больных с разными формами афазии. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: лингвистика и межкультурная коммуникация, 2015, (4), 74–81.
70. Литвинова Л.Д., Печенкова Е.В., Власова Р.М., Березуцкая Ю.Н., Синицын В.Е. Локализация зон, связанных с восприятием речи: сопоставление трех проб для фМРТ на материале русского языка. Международный симпозиум по нейроимиджингу: фундаментальные исследования и клиническая практика. М.: МГППУ, 2012. С. 76–79.
71. Rosazza C., Aquino D., D'Incerti L., Cordella R., Andronache A., Zaca D., Bruzzone M.G., Tringali G., Minati L. Preoperative mapping of the sensorimotor cortex: comparative assessment of task-based and resting-state FMRI. PLoS One, 2014, 9(6), e98860. doi:10.1371/journal.pone.0098860
72. Vakamudi K., Posse S., Jung R., Cushman B., Chohan M.O. Real-time presurgical resting-state fMRI in patients with brain tumors: Quality control and comparison with task-fMRI and intraoperative mapping. Hum Brain Mapp, 2020, 41(3), 797–814. doi:10.1002/hbm.24840
73. Schneider F.C., Paillet M., Faillenot I., Vassal F., Guyotat J., Barral F.G., Boutet C. Presurgical Assessment of the

- Sensorimotor Cortex Using Resting-State fMRI. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2016, 37(1), 101–107. doi:10.3174/ajnr.A4472
74. Fisicaro R.A., Jiao R.X., Stathopoulos C., Petrovich Brennan N.M., Peck K.K., Holodny A.I. Challenges in Identifying the Foot Motor Region in Patients with Brain Tumor on Routine MRI: Advantages of fMRI. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2015, 36(8), 1488–1493. doi:10.3174/ajnr.A4292
75. Ramsey N.F., Sommer I.E., Rutten G.J., Kahn R.S. Combined analysis of language tasks in fMRI improves assessment of hemispheric dominance for language functions in individual subjects. *Neuroimage*, 2001, 13(4), 719–733. doi:10.1006/nimg.2000.0722
76. Rumshiskaya A.D., Vlasova R., Litvinova L., Pechenkova E., Merzhina E.A. Combined analysis of two tasks improves localization of Wernicke's area in patients with primary brain tumors. *European Congress of Radiology (ECR), Vienna, Austria. European Society of Radiology*, 2014. doi:10.1594/ecr2014/C-1232
77. Bauer P.R., Reitsma J.B., Houweling B.M., Ferrier C.H., Ramsey N.F. Can fMRI safely replace the Wada test for preoperative assessment of language lateralisation? A meta-analysis and systematic review. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 2014, 85(5), 581–588. doi:10.1136/jnnp-2013-305659
78. Bradshaw A.R., Thompson P.A., Wilson A.C., Bishop D.V.M., Woodhead Z.V.J. Measuring language lateralisation with different language tasks: a systematic review. *PeerJ*, 2017, 5, e3929. doi:10.7717/peerj.3929
79. Omisade A., O'Grady C.B., Schmidt M.H., Fisk J.D. Visual and Auditory fMRI Paradigms for Presurgical Language Mapping: Convergent Validity and Relationship to Individual Variables. *Neurol Res Int*, 2019, 2019, 6728120. doi:10.1155/2019/6728120
80. Wilson S.M., Bautista A., Yen M., Lauderdale S., Eriksson D.K. Validity and reliability of four language mapping paradigms. *Neuroimage Clin*, 2017, 16, 399–408. doi:10.1016/j.nicl.2016.03.015
81. Berro D.H., Lemee J.M., Leiber L.M., Emery E., Menei P., Ter Minassian A. Overt speech feasibility using continuous functional magnetic resonance imaging: Isolation of areas involved in phonology and prosody. *J Neurosci Res*, 2020, 98(12), 2554–2565. doi:10.1002/jnr.24723
82. Паникратова Я.Р. Индивидуальный подход к пациенту при фМРТ-исследовании. Доклад 10.11.2018 г. на Конгрессе Российского общества рентгенологов и радиологов (POPP).
83. Kundu B., Penwarden A., Wood J.M., Gallagher T.A., Andreoli M.J., Voss J., Meier T., Nair V.A., Kuo J.S., Field A.S., Moritz C., Meyerand M.E., Prabhakaran V. Association of functional magnetic resonance imaging indices with postoperative language outcomes in patients with primary brain tumors. *Neurosurg Focus*, 2013, 34(4), E6. doi:10.3171/2013.2.FOCUS12413
84. Polczynska M.M. Organizing Variables Affecting fMRI Estimates of Language Dominance in Patients with Brain Tumors. *Brain Sci*, 2021, 11(6) doi:10.3390/brainsci11060694
85. FitzGerald D.B., Cosgrove G.R., Ronner S., Jiang H., Buchbinder B.R., Belliveau J.W., Rosen B.R., Benson R.R.

- Location of Language in the Cortex: A Comparison between Functional MR Imaging and Electroconvulsive Stimulation. *American Journal of Neuroradiology*, 1997, 18(8), 1529–1539.
86. Roux F.E., Boulanouar K., Lotterie J.A., Mejdoubi M., LeSage J.P., Berry I. Language functional magnetic resonance imaging in preoperative assessment of language areas: correlation with direct cortical stimulation. *Neurosurgery*, 2003, 52(6), 1335–1345; discussion 1345–1337. doi:10.1227/01.neu.0000064803.05077.40
87. Grummich P., Nimsky C., Pauli E., Buchfelder M., Ganslandt O. Combining fMRI and MEG increases the reliability of presurgical language localization: a clinical study on the difference between and congruence of both modalities. *Neuroimage*, 2006, 32(4), 1793–1803. doi:10.1016/j.neuroimage.2006.05.034
88. Najib U., Bashir S., Edwards D., Rotenberg A., Pascual-Leone A. Transcranial brain stimulation: clinical applications and future directions. *Neurosurg Clin N Am*, 2011, 22(2), 233–251, ix. doi:10.1016/j.nec.2011.01.002