

ЛЕКЦИЯ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2017

ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА В НЕЙРОХИРУРГИИ**А.С. Токарев, В.Н. Степанов, Ю.И. Шатохина, С.А. Чувилин, А.З. Шалумов**

НИИ скорой помощи им. Н. В. Склифосовского, 129090, Большая Сухаревская пл., д. 3., Москва

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) — современный неинвазивный, не сопровождающийся ионизирующим излучением, метод нейровизуализации, который позволяет локализовать зоны головного мозга, ответственные за выполнение различных функций. Физиологические принципы фМРТ основаны на регистрации слабовыраженных гемодинамических изменений, происходящих в головном мозге во время его активации.

Применение фМРТ на предоперационном этапе позволяет уточнить тактику, с целью сохранения эloquentных зон головного мозга, что является одной из важнейших задач нейрохирургии. За последние 10 лет методику широко внедряют в практику и используют как на предоперационном этапе, так и во время операции у пациентов с объемными образованиями головного мозга и другой нейрохирургической патологией, например фармакорезистентной эпилепсией. В будущем совмещение анатомических МР-изображений высокого разрешения и данных функциональных исследований, таких как электроэнцефалография и фМРТ, будет способствовать выявлению и подробному изучению таких патологических изменений, диагностика которых в настоящий момент затруднена. К примеру, станет возможным определение патологических сетей, ответственных за формирование эпилептической активности в головном мозге, что позволит планировать нейрохирургическое оперативное вмешательство, направленное на их устранение.

Ключевые слова: фМРТ, BOLD-контрастные изображения, функционально-значимые зоны, нейрохирургия, нейронавигация.

Functional magnetic resonance imaging (fMRI) is a modern, non-invasive method of the neurovisualisation allowed measuring and localizing specific areas of the human brain, responsible for some functions, without application of radiation. Physiological principles of fMRI are based on detecting of small changes in blood flow in the brain areas in response to increasing demands during metabolic activation. This technique has grown rapidly in popularity over the past decade and is being used increasingly in neurosurgery for both preoperative planning and intraoperative neurosurgical decision making in patients with brain tumors and other neurosurgical pathologies such as intractable epilepsy. If the patient needs tumor resection or removing a portion of the brain responsible for initiating epileptic seizures, the preservation of functions during operation is an essential goal of neurosurgery and fMRI allows planning surgical approach that will spare as much of these areas as possible.

The combined registration of high resolution anatomic and physiological data from multiple complementary sources such like electroencephalogram (EEG) and fMRI, which provide insights into the networks underlying seizure generation will be used to investigate many pathological processes and plan more neurosurgical procedures in the future.

Key words: fMRI; BOLD contrast, Brain mapping, eloquent areas, neurosurgery.

Введение

Развитие методов нейровизуализации, микронейрохирургии, минимально инвазивных методов лечения, нейроанестезии и нейрореанимации способствовало развитию нейрохирургии [1]. Появилась возможность одновременного использования безрамной стереотаксической нейронавигации и нейрохирургического микроскопа, что позволило значительно снизить количество интраоперационных и послеоперационных осложнений, приводящих впоследствии к инвалидизации или смерти пациента. Активное внедрение в практику здравоохранения современных визуализационных методик и интраоперацион-

ной навигации сделало возможным точное определение анатомических взаимоотношений между патологическим образованием и функционально значимыми зонами головного мозга уже на этапе предоперационной подготовки, с последующим использованием этой информации в ходе оперативного вмешательства. Существует ряд методик, позволяющих получить информацию о расположении функционально значимых зон в головном мозге. К ним относятся прямая электрокортикография, латерализующий интракаротидный тест Вада, транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС), позитронная эмиссионная компьютерная томография (ПЭТ-КТ), однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и функ-

циональная магнитно-резонансная томография (фМРТ). До сих пор «золотым стандартом» считается прямую электрокортикографию — метод, при котором производят регистрацию биоэлектрической активности головного мозга непосредственно с коры, реже — с глубинных структур. Чаще всего электрокортикографию проводят интраоперационно. На участок головного мозга накладывают стерильные силиконовые пластинки с внедренными в них электродами, регистрирующими биопотенциалы в данной области. Для картирования функционально значимых зон производят раздражение тех или иных участков коры электрическим током нарастающей интенсивности (чтобы избежать повреждения), что приводит к определенному ответу, по которому нейрохирург и нейрофизиолог могут судить о расположении, размере и конфигурации функционально значимых зон. Методика однако имеет существенные недостатки, основной из которых — инвазивность. К недостаткам метода также относят краткое время интраоперационного исследования, ограниченное «поле зрения», зависимость результатов от использования противосудорожных препаратов и анестетиков при лечении пациента [2], сложность интерпретации полученных данных. Это привело к возникновению потребности в неинвазивных методах, с относительно простым алгоритмом выполнения. Активное развитие получила фМРТ, позволяющая картировать функционально-значимые зоны коры головного мозга, активируемые в ответ на выполнение специальных заданий. Полученные данные можно использовать на этапе планирования оперативного вмешательства, что позволяет комплексно оценить топографо-анатомические характеристики патологического очага, его взаимоотношение с функционально-значимыми центрами, определить объем оперативного вмешательства и повысить точность прогноза риска развития осложнений. Изображения также можно перенести в нейронавигационную станцию и в микроскоп с последующим использованием их в ходе операции.

Физические основы метода

Для понимания природы формирования изображений, получаемых при проведении фМРТ и правильной интерпретации полученных данных, необходимо иметь представление о физических принципах метода и физиологических процессах, происходящих при активации головного мозга. Одним из основных процессов является изменение концентрации деоксигенированного гемоглобина в венозной крови дренирующих вен головного мозга, возникающее на фоне повышения или понижения нейрональной активности. Это явление имеет название BOLD-ответа (аббревиатура от англ. Blood Oxygenation Level Dependent), а изображения, полученные в ходе фМРТ, называются BOLD-контрастными [3—6]. При повышении нейрональной активности в определенной зоне головного мозга происходит локальное увеличение энергетической потребности и увеличение кровотока. Это в свою очередь вызывает увеличение концентрации оксигенированного и снижение концентрации деоксигенированного гемоглобина. Дезоксигемоглобин является парамагнетиком, поэтому сосуды, заполненные кровью, содержащей значительное его количество, создают локальную гетерогенность магнитного поля, которая является причиной расфазирования магнитных моментов спинов (ядер атомов водорода) и потери МР-сигнала. При повышении активности происходит увеличение кровотока в коре и снижение содержания в крови дезоксигемоглобина, что приводит к снижению степени расфазирования и к увеличению интенсивности МР-сигнала.

Графически изменение BOLD-сигнала во времени изображается в виде кривой гемодинамического ответа (рис.1). В самом начале, в ответ на повышение активности происходит кратковременное повышение концентрации деоксигенированного гемоглобина — отрицательный пик на кривой. Дальнейшее увеличение энергетических потребностей приводит к локальному повышению скорости кровотока. Этот процесс проис-

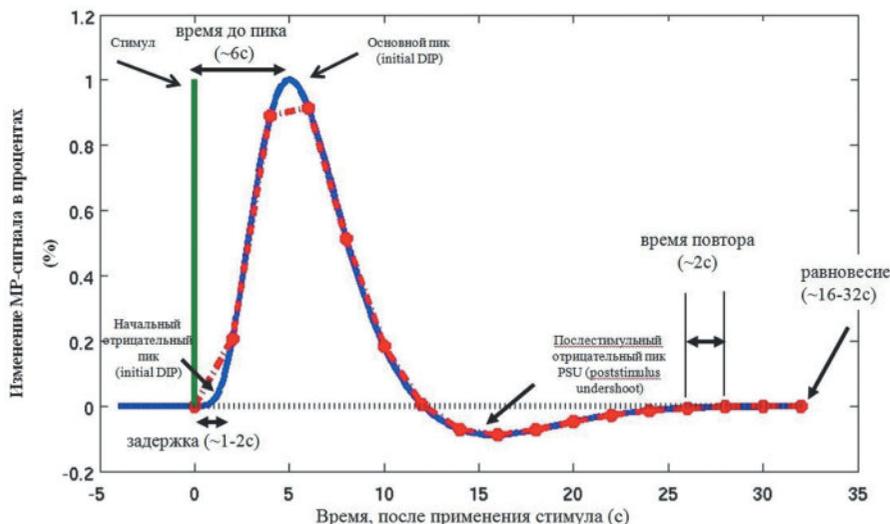


Рис. 1. Графическое изображение гемодинамического ответа.
Fig. 1. Graphic presentation of hemodynamic response.

ходит непропорционально и превышает потребность в кислороде, что ведет к «вымыванию» дезоксигемоглобина и формированию высокого положительного пика на графике (3-7-я секунды). После этого уровень сигнала возвращается к изолинии. Здесь иногда может возникать второй отрицательный пик небольшой по амплитуде. Этому есть несколько объяснений, одно из них — замедленное изменение показателя CBV, связанное с медленной реакцией сосудистой стенки вен. Второе объяснение — резкое прекращение доставки оксигенированной крови при сохраняющейся остаточной потребности в кислороде приводит к кратковременному увеличению соотношения деоксигенированного/оксигенированного гемоглобин, что вызывает понижение МР-сигнала [7]. Описанные изменения МР-сигнала регистрируются на протяжении всего исследования для каждого элемента объемного изображения, называемого вокселем. Количество вокселей в срезе или размер матрицы, в зависимости от цели исследования может меняться, как правило, в диапазоне между 32x32 и 128x128. Количество срезов — 25-30, толщиной 3-4 мм, этого обычно достаточно для покрытия всего головного мозга. Совокупность всех вокселей представляет собой объем данных, который проходит статистическую обработку в автоматическом режиме. В основе лежит методика проверки статистических гипотез, основной линейной модели и регрессионного анализа [8]. Важно отметить, что BOLD-сигнал не является прямым показателем нейрональной активности, а только отражает изменение гемодинамических показателей, которые достоверно коррелируют с активацией. Поэтому для повышения статистической достоверности при выполнении исследования многократно чередуют периоды выполнения специальной задачи и периоды покоя. Количество и длительность таких периодов определяются параметрами парадигмы. Далее в автоматическом режиме происходит вычитание результатов, полученных в периоды покоя, из результатов, полученных во время активации.

Только после статистического анализа формируют карты активации, пригодные для клинического применения. Для повышения информативности их совмещают с анатомическими изображениями головного мозга.

Клиническое применение

Клиническое применение фМРТ с целью предоперационной подготовки чаще всего заключается в картировании речевых центров, моторных зон верхних и нижних конечностей, коркового центра зрительного анализатора.

Картирование речевых зон

Речевая функция осуществляется через обширную сеть функционально активных центров, расположенных в лобной, теменной и височной

долях, связанных дугообразным пучком [9,10]. Посредством фМРТ определяют локализацию моторного центра речи, называемого также зоной Брока, расположенного в задненижней части нижней лобной извилины левого полушария (у правой). А также локализацию сенсорного центра речи (зона Вернике), расположенного в задней части верхней височной извилины, кзади от первичной слуховой коры. Данные о расположении этих центров позволяют определить доминантное полушарие, ответственное за формирование речи, что является одной из важнейших задач на этапе предоперационного планирования хирургического лечения эпилепсии, а также объемных образований височной и лобной долей. В настоящее время «золотым стандартом» определения доминантного полушария является такая методика, как тест Вада [11–13].

Тест Вада заключается в селективном интраартериальном введении амобарбитала натрия (в РФ для проведения теста используют пропофол) в одну из сонных артерий, что вызывает кратковременную утрату функций гомолатерального полушария. Когда препарат достигает полушария, ответственного за речь, развивается тотальная афазия, которая длится от 30 с до 2 мин, что при одновременном выполнении речевых тестов позволяет определить доминантное полушарие. Однако существует ряд недостатков, к которым относят инвазивность методики и доказанные осложнения, развивающиеся в 10% наблюдений (ишемический инсульт, энцефалопатия, судорожные состояния) [14].

В связи с этим такая методика, как фМРТ, для определения доминантного речевого полушария быстро набирает популярность [9, 15, 16]. Помимо неинвазивности преимуществом метода фМРТ является возможность независимого картирования моторного (зона Брока) и сенсорного (зона Вернике) центров речи. Выполнение исследования в большинстве случаев не требует привлечения специалиста клинического профиля и может быть повторено многократно, ввиду отсутствия ионизирующего излучения. Для картирования моторного речевого центра (Брока) пациенту предъявляют парадигму, направленную на генерацию слов, например, придумать как можно большее количество глаголов, начинающихся с предъявленной буквы, или назвать предметы, изображенные на меняющихся картинках. Периоды выполнения задания сменяются периодами отдыха, в течение которых пациент смотрит на перекрестие в центре экрана, что уменьшает движения головы. Сенсорный речевой центр (зона Вернике) визуализируют при прослушивании пациентом фрагмента аудиокниги. Результаты, получаемые при этом, изображены на рис. 2, 3.

Картирование моторных центров верхних и нижних конечностей

Для определения локализации моторных центров в коре головного мозга пациенту во время

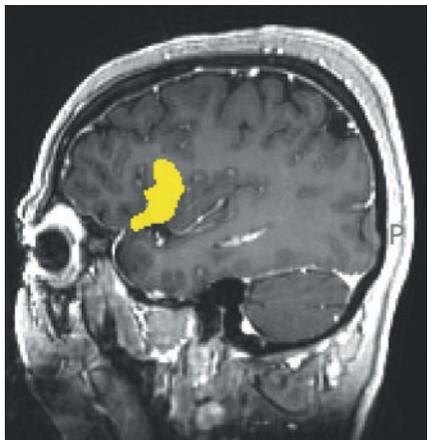


Рис. 2. Зона активации, зарегистрированная при выполнении фМРТ моторного центра речи (зона Брока).
Fig. 2. Activation zone, registered during fMRI of Broca area (motor area of speech).

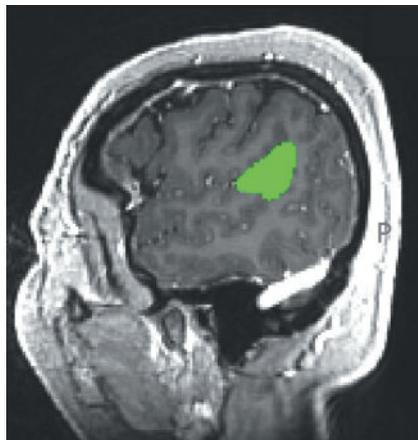


Рис. 3. Зона активации, зарегистрированная при выполнении фМРТ сенсорного центра речи (зона Вернике).
Fig. 3. Activation zone, registered during fMRI of Wernicke area (sensor area of speech).

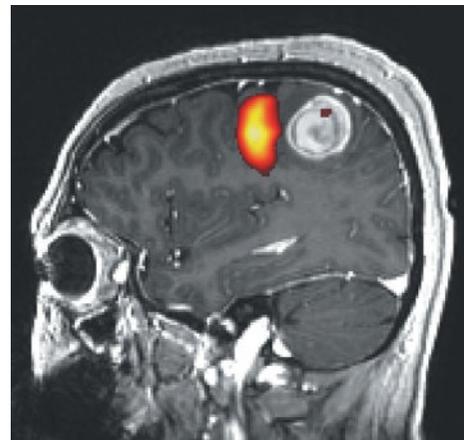


Рис. 4. Зона активации, зарегистрированная при выполнении фМРТ моторного центра левой руки (сагиттальная плоскость).
Fig. 4. Activation zone, registered during fMRI of motor area of left hand (sagittal view).

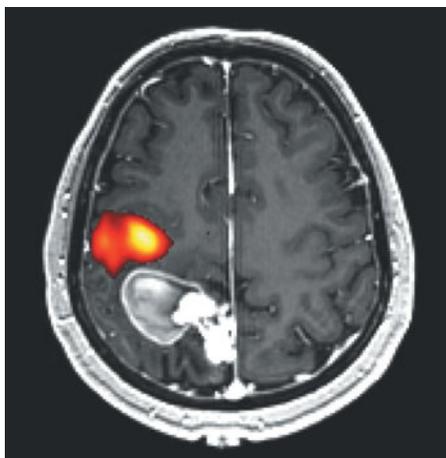


Рис. 5. Зона активации, зарегистрированная при выполнении фМРТ моторного центра левой руки (аксиальная плоскость).
Fig. 5. Activation zone, registered during fMRI of motor area of left hand (axial view).

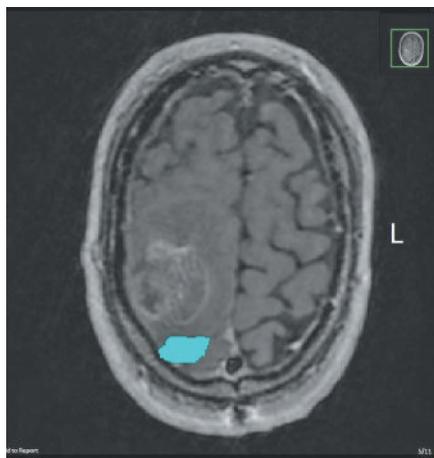


Рис. 6. Зона активации, зарегистрированная при выполнении фМРТ моторного центра левой ноги.
Fig. 6. Activation zone, registered during fMRI of motor area of left leg.

исследования необходимо выполнять действия, приводящие к активации этих центров. При картировании моторного центра руки пациент выполняет ритмичное сжимание первых трех пальцев в «шепотку», для активации моторного центра ноги — совершает сгибательные движения пальцами или в голеностопном суставе. Чтобы обозначить период выполнения движений, через специальные мультимедийные очки предъявляется визуальный стимул в виде мигающей точки. Во время периодов покоя пациента фиксирует взгляд на перекрестии в центре экрана. Описанная методика позволяет достоверно визуализировать моторные центры конечностей (рис. 4—6). Полученные в результате этого

функциональные карты в значительной степени совпадают с картами, полученными при кортикальной электростимуляции, — до 84% [17—19]. Моторные тесты по результатам многочисленных исследований показали наибольшую достоверность и постоянство [20—22]. Простота выполнения исследования и достоверность полученных результатов способствуют широкому внедрению метода в повседневную клиническую практику. Доказано, что использование данных о расположении моторных зон во время нейрохирургической операции помогает повысить точность хирургического вмешательства и предотвратить возникновение неврологического дефицита (рис. 7) [20, 21, 23].

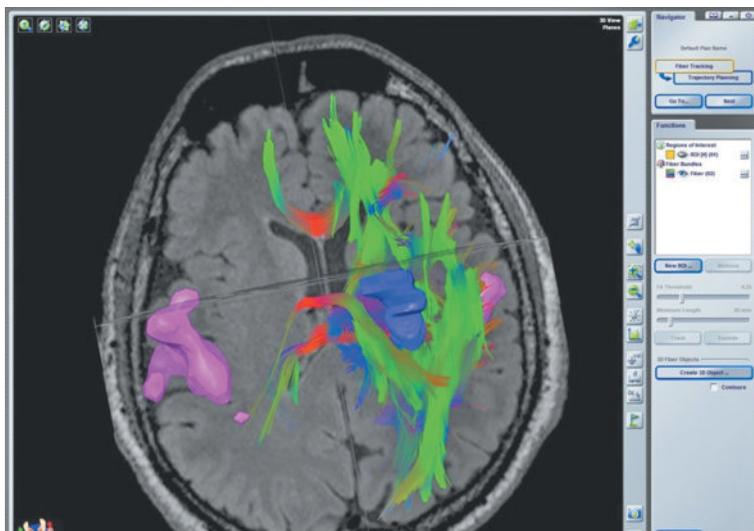


Рис. 7. Данные фМРТ и трактографии, совмещенные с анатомическими МР-изображениями головного мозга. Фото, полученное с монитора нейронавигационной системы BrainLab.

Fig. 7. Data of fMRI and tractography in coincidence with anatomical MRI images of brain (photography from the monitor of neuronavigation BrainLab system).

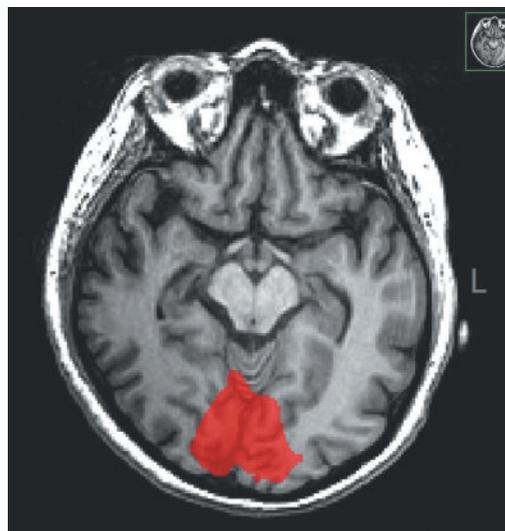


Рис. 8. Зона активации головного мозга, зарегистрированная при выполнении фМРТ коркового представительства зрительного анализатора.

Fig. 8. Activation zone, registered during FMRI of cortex area of vision.

В последнее время ведутся работы в направлении усложнения моторных парадигм с целью одновременного определения большего количества функционально-активных зон. Это позволяет получить представление о взаимодействии всех отделов головного мозга, принимающих участие в регуляции двигательной активности как в норме, так и при патологических изменениях, а также оценить динамику реорганизации коры головного мозга при повреждениях. Такие патологические изменения, как объемные образования и ишемическое повреждение головного мозга, часто сопровождаются развитием неврологического дефицита, что затрудняет картирование моторных зон ввиду отсутствия возможности выполнения движений при проведении фМРТ. В таких случаях прибегают к методу пассивной имитации моторной активности. Однако это сопровождается привлечением дополнительных лиц к процессу исследования, а также к увеличению двигательных артефактов. Одна из актуальных научных работ, направленных на решение этих проблем, была выполнена на базе ФГБНУ «Научный центр неврологии», в ходе чего были разработаны парадигмы и сконструировано пневматическое устройство для имитации ходьбы во время проведения фМРТ [24, 25].

Картирование коркового представительства зрительного анализатора

Корковое представительство зрительного анализатора расположено на внутренней поверхности затылочных долей обоих полушарий в области шпорной борозды и прилегающих извилин. Зрительные зоны представляют собой проекцию

сетчатки глаза. Афферентные импульсы поступают в эту область от наружных колленчатых тел, где находятся третьи нейроны зрительного пути.

Выполнение фМРТ для картирования зрительных центров необходимо для предотвращения их повреждения во время операции при наличии патологического очага, локализованного в затылочных долях. Простейшим зрительным стимулом для картирования зрительных центров является изображение мелькающей шахматной доски. Можно также применять более сложные зрительные стимулы, носящие эмоциональную окраску, в таком случае будет активироваться не только зрительная область, но и другие центры, ответственные за зрительное восприятие и обработку информации. Картирование зрительных центров можно применять вместе с другими методиками, например, диффузионно-тензорной МРТ (diffusion tensor imaging — DTI). Такая совокупность методов дает подробное представление об анатомических взаимоотношениях патологического очага, функционально-значимых зон коры и проводящих путей, связывающих несколько центров (рис. 8). Недавние исследования [26–28] показали, что у пациентов с постишемическими изменениями в теменно-затылочной области, на фоне проводимых реабилитационных мероприятий, в числе которых была гипербарическая оксигенация [27], наблюдали изменения в зонах активации в виде увеличения количества активных вокселей и увеличение показателя фракционной анизотропии. Таким образом, фМРТ в совокупности в DTI может служить эффективным методом оценки восстановления функций и прогнозирования отсроченных результатов.

Электроэнцефалография, ассоциированная с фМРТ

Выявление фокусов эпилептической активности и определение их локализации — одна из основных задач предоперационной подготовки у пациентов, готовящихся к хирургическому лечению по поводу эпилепсии. Однако это является довольно трудной задачей.

Такие методики, как скальповая электроэнцефалография (ЭЭГ), структурная МРТ, ПЭТ КТ и ОФЭКТ доказали свою эффективность в большом количестве наблюдений [29, 30]. Однако при довольно высокой эффективности, примерно в 15% наблюдений приходится отказываться от хирургического лечения эпилепсии из-за отсутствия информации о точной локализации эпилептогенного очага [29]. Одним из методов, позволяющих более точно локализовать эпилептогенный очаг, является одновременное выполнение МРТ и ЭЭГ. J. Ives и соавт. (1993) первыми продемонстрировали возможность одновременного выполнения фМРТ и ЭЭГ [31]. С этого времени методику стали успешно применять в диагностике эпилепсии. Было получено множество полезных данных при изучении формирования эпилептогенной активности в интраиктальном и межприступном периодах [32–34]. Применение метода позволяет выявить эпилептогенный очаг с помощью ЭЭГ и с высокой точностью локализовать его на анатомическом МР-изображении. Одновременная регистрация очаговых нейрофизиологических изменений и участков изменения BOLD-контраста обеспечивает новое пространственное трехмерное картирование патологического очага. Выявлен интересный факт — очаги патологической активности в интра- и межиктальных периодах могут иметь различную локализацию. Например, у пациентов с различными типами аномалии формирования коры наблюдали изменения, ассоциированные с изменениями BOLD-сигнала в разных отделах головного мозга [26].

Преимущества и недостатки метода

Функциональная МРТ имеет множество преимуществ в сравнении с другими диагностическими методиками. Прежде всего к таковым относят полную неинвазивность (метод не требует выполнения инъекций, введения препаратов, хирургических манипуляций), что в итоге снижает риск возникновения осложнений. Это позволяет широко применять фМРТ у пациентов различных возрастных категорий, в том числе у детей [15]. Выполнение фМРТ не сопровождается ионизирующим излучением, в отличие от ПЭТ-КТ и ОФЭКТ, и позволяет многократно повторять исследование при необходимости. Проведение фМРТ не является трудно выполнимой задачей при наличии квалифицированных специалистов-радиологов.

Наряду с преимуществами, метод имеет ряд ограничений и недостатков. Низкое пространственное разрешение данных фМРТ в сравнении с

анатомическими изображениями. Высокая чувствительность к наличию даже минимальных по объему металлических инородных тел (стружка после трепанации черепа). Сложность интерпретации полученных данных, частично связанная с недостаточным количеством накопленной информации (зачастую затруднительно судить о взаимоотношениях между позитивным и негативным изменением BOLD-сигнала и их корреляцией с патологическими изменениями головного мозга) [34]. Сохраняющиеся недоработки программного обеспечения, используемого для анализа полученных результатов. В некоторых случаях для полноценной обработки результатов необходимо использование большого количества программ, что требует участия в процессе специалистов технического профиля (физиков, программистов и т.д.).

Заключение

Предотвращение травматизации функционально-значимых зон головного мозга во время операции — одна из важнейших задач нейрохирургии. Для ее решения разработано и внедрено в клиническую практику множество различных диагностических методов. Являясь одним из таких методов, функциональная МРТ при наличии сравнительно небольшого количества недостатков имеет ряд существенных преимуществ. С помощью метода можно с высокой достоверностью картировать функционально-значимые зоны головного мозга, что вносит большой вклад в выбор хирургической тактики и определяет особенности послеоперационного ведения пациента. Функциональная МРТ позволяет прогнозировать возможные риски интра- и послеоперационных осложнений.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Токарев Алексей Сергеевич — канд. мед. наук, врач-нейрохирург, заведующий отделением «Центр радиохирургии», e-mail: mail@rssklif.ru

Степанов Валентин Николаевич — врач-рентгенолог отделения «Центр радиохирургии»

Шатохина Юлия Ивановна — врач-рентгенолог отделения «Центр радиохирургии»

Чувилин Станислав Александрович — врач-рентгенолог отделения «Центр радиохирургии»

Шалумов Арнольд Зирович — д-р мед. наук, ст. научн. сотр. отделения неотложной нейрохирургии ГБУЗ «НИИ скорой помощи им. Н.В. Склифосовского ДЗМ г. Москвы».

ЛИТЕРАТУРА

1. Хирургия аневризм головного мозга. Под ред. акад. В.В. Крылова. В трех томах. Том I. Мск., 2011. — 432 с. — илл.
2. Bindra, Ashish et al. Comparison of the effects of different anesthetic techniques on electrocorticography in patients undergoing epilepsy surgery. *Seizure-European Journal of Epilepsy*, Volume 21, Issue 7, 501 — 507.
3. Ogawa S., Lee T.M., Nayak A.S., Glynn P. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med* 1990;14(1):68-78.

4. Benar C.G., Gross D.W., Wang Y. et al. The BOLD response to interictal epileptiform discharges. *Neuroimage* 2002;17(3):1182-92.
5. Keogh B.P., Cordes D. Quantitative approaches to functional MRI: applications in epilepsy. *Epilepsia* 2007;48 Suppl 4:27-36.
6. Sullivan J.E., 3rd, Detre J.A. Functional magnetic resonance imaging in the treatment of epilepsy. *Curr Neurol Neurosci Rep* 2005;5 (4):299-306.
7. Malonek D., Grinvald A. Interactions between electrical activity and cortical microcirculation revealed by imaging spectroscopy: implications for functional brain mapping. *Science* 1996;272 (5261):551-4.
8. Haller S., Bartsch A.J. Pitfalls in fMRI. *Eur Radiol* 2009;19(11):2689-706.34.
9. Bookheimer S. Pre-surgical language mapping with functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychol Rev* 2007;17(2):145-55.
10. Swanson S.J., Sabsevitz D.S., Hammeke T.A., Binder J.R. Functional magnetic resonance imaging of language in epilepsy. *Neuropsychol Rev* 2007;17(4):491-504.
11. Aldenkamp A.P., Boon P.A., Deblaere K. et al. Usefulness of language and memory testing during intracarotid amobarbital testing: observations from an fMRI study. *Acta Neurol Scand* 2003;108(3):147-52.
12. Arora J., Pugh K., Westerveld M., et al. Language lateralization in epilepsy patients: fMRI validated with the Wada procedure. *Epilepsia* 2009;50(10): 2225-41.
13. Szaflarski J.P., Holland S.K., Jacola L.M. et al. Comprehensive presurgical functional MRI language evaluation in adult patients with epilepsy. *Epilepsy Behav* 2008;12(1):74-83.
14. Loddenkemper T., Morris H.H., Moddel G. Complications during the Wada test. *Epilepsy Behav* 2008;13(3):551-3.
15. Chakraborty A., McEvoy A.W. Presurgical functional mapping with functional MRI. *Curr Opin Neurol* 2008;21(4):446-51.
16. Powell H.W., Duncan J.S. Functional magnetic resonance imaging for assessment of language and memory in clinical practice. *Curr Opin Neurol* 2005;18(2):161-6 .
17. De Tiege X., Connelly A., Liegeois F. et al. Influence of motor functional magnetic resonance imaging on the surgical management of children and adolescents with symptomatic focal epilepsy. *Neurosurgery* 2009;64(5):856-64; discussion 864.
18. Lee C.C., Ward H.A., Sharbrough F.W. et al. Assessment of functional MR imaging in neurosurgical planning. *AJNR Am J Neuroradiol* 1999;20(8):1511-19.
19. Meier J.D., Aflalo T.N., Kastner S., Graziano M.S. Complex organization of human primary motor cortex: a high-resolution fMRI study. *J Neurophysiol* 2008;100(4):1800-12.
20. Trenerry M.R., Jack C.R., Jr., Ivnik R.J. et al. MRI hippocampal volumes and memory function before and after temporal lobectomy. *Neurology* 1993;43(9):1800-5.
21. Yoo S.S., Wei X., Dickey C.C. et al. Long-term reproducibility analysis of fMRI using hand motor task. *Int J Neurosci* 2005;115(1):55-77.
22. Gountouna V.E., Job D.E., McIntosh A.M. et al. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) reproducibility and variance components across visits and scanning sites with a finger tapping task. *Neuroimage* 2010;49(1):552-60.
23. Mehta A.D., Klein G. Clinical utility of functional magnetic resonance imaging for brain mapping in epilepsy surgery. *Epilepsy Res* 2010;89(1):126-32.
24. Кремнева Е.И., Черникова Л.А., Коновалов Р.Н. и др. Активация сенсомоторной коры при использовании аппарата для механической стимуляции опорных зон стопы. *Физиология человека* 2012;38(1): 61-68.
25. Кремнева Е.И., Черникова Л.А., Коновалов Р.Н. и др. Оценка супраспинального контроля локомоции в норме и при патологии с помощью пассивной моторной фМРТ парадигмы. *Анналы клинической и экспериментальной неврологии* 2012;6:1: 31-37.
26. Polonara G., Salvolini S., Fabri M. et al. Unilateral visual loss due to ischaemic injury in the right calcarine region: a functional magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging follow-up study. *Int Ophthalmol* 2011;31(2):129-34.
27. Chen Z., Ni P., Lin Y. et al. Visual pathway lesion and its development during hyperbaric oxygen treatment: a bold- fMRI and DTI study. *J Magn Reson Imaging* 2010;31(5):1054-60.
28. Seghier M.L., Lazeyras F., Zimine S., et al. Visual recovery after perinatal stroke evidenced by functional and diffusion MRI: case report. *BMC Neurol* 2005; 5:17.
29. Berg A.T., Vickrey B.G., Langfitt J.T. et al. The multicenter study of epilepsy surgery: recruitment and selection for surgery. *Epilepsia*. 2003;44(11):1425-33. Haller S, Bartsch A.J. Pitfalls in fMRI. *Eur Radiol* 2009;19(11): 2689-706
30. Zijlmans M., Huiskamp G., Hersevoort M., et al. EEG-fMRI in the preoperative workup for epilepsy surgery. *Brain* 2007;130(Pt 9):2343-53.
31. Ives J.R., Warach S., Schmitt F. et al. Monitoring the patient's EEG during echo planar MRI. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993;87(6):417-20.
32. Zijlmans M., Huiskamp G., Hersevoort M. et al. EEG-fMRI in the preoperative workup for epilepsy surgery. *Brain* 2007;130(Pt 9):2343-53.
33. Bagshaw A.P., Aghakhani Y., Benar C.G. et al. EEG-fMRI of focal epileptic spikes: analysis with multiple haemodynamic functions and comparison with gadolinium-enhanced MR angiograms. *Hum Brain Mapp* 2004;22(3):179-92.
34. Vulliemoz S., Lemieux L., Daunizeau J. et al. The combination of EEG source imaging and EEG-correlated functional MRI to map epileptic networks. *Epilepsia* 2010;51(4):491-505.

REFERENCES

1. Krylov V.V. et al. Surgery of brain aneurysms. Tom I. Msk., 2011. — 432 s. — ill.(in Russian)
2. Bindra, Ashish et al. Comparison of the effects of different anesthetic techniques on electrocorticography in patients undergoing epilepsy surgery. *Seizure — European Journal of Epilepsy* , Volume 21 , Issue 7 , 501 — 507
3. Ogawa S, Lee TM, Nayak AS, Glynn P. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med*. 1990;14(1):68-78.
4. Benar CG, Gross DW, Wang Y, et al. The BOLD response to interictal epileptiform discharges. *Neuroimage*. 2002;17(3):1182-92.
5. Keogh BP, Cordes D. Quantitative approaches to functional MRI: applications in epilepsy. *Epilepsia*. 2007;48 Suppl 4:27-36.
6. Sullivan JE, 3rd, Detre JA. Functional magnetic resonance imaging in the treatment of epilepsy. *Curr Neurol Neurosci Rep*. 2005;5 (4):299-306.
7. Malonek D, Grinvald A. Interactions between electrical activity and cortical microcirculation revealed by imaging spectroscopy: implications for functional brain mapping. *Science*. 1996;272 (5261):551-4.
8. Haller S, Bartsch AJ. Pitfalls in fMRI. *Eur Radiol*. 2009;19(11): 2689-706.34.
9. Bookheimer S. Pre-surgical language mapping with functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychol Rev*. 2007;17(2):145-55.
10. Swanson SJ, Sabsevitz DS, Hammeke TA, Binder JR. Functional magnetic resonance imaging of language in epilepsy. *Neuropsychol Rev*. 2007;17(4):491-504.
11. Aldenkamp AP, Boon PA, Deblaere K, et al. Usefulness of language and memory testing during intracarotid amobarbital testing: observations from an fMRI study. *Acta Neurol Scand*. 2003; 108(3):147-52.
12. Arora J, Pugh K, Westerveld M, Spencer S, Spencer DD, Todd Constable R. Language lateralization in epilepsy patients: fMRI validated with the Wada procedure. *Epilepsia*. 2009;50(10): 2225-41.
13. Szaflarski JP, Holland SK, Jacola LM, Lindsell C, Privitera MD, Szaflarski M. Comprehensive presurgical functional MRI language evaluation in adult patients with epilepsy. *Epilepsy Behav*. 2008;12(1):74-83.
14. Loddenkemper T, Morris HH, Moddel G. Complications during the Wada test. *Epilepsy Behav*. 2008;13(3):551-3.
15. Chakraborty A, McEvoy AW. Presurgical functional mapping with functional MRI. *Curr Opin Neurol*. 2008;21(4):446-51.
16. Powell HW, Duncan JS. Functional magnetic resonance imaging for assessment of language and memory in clinical practice. *Curr Opin Neurol*. 2005;18(2):161-6
17. De Tiege X, Connelly A, Liegeois F, et al. Influence of motor functional magnetic resonance imaging on the surgical management of children and adolescents with symptomatic

- focal epilepsy. *Neurosurgery*. 2009;64(5):856-64; discussion 864.
18. Lee CC, Ward HA, Sharbrough FW, et al. Assessment of functional MR imaging in neurosurgical planning. *AJNR Am J Neuroradiol*. 1999;20(8):1511-19
 19. Meier JD, Aflalo TN, Kastner S, Graziano MS. Complex organization of human primary motor cortex: a high-resolution fMRI study. *J Neurophysiol*. 2008;100(4):1800-12.
 20. Trenerry MR, Jack CR, Jr., Ivnik RJ, et al. MRI hippocampal volumes and memory function before and after temporal lobectomy. *Neurology*. 1993;43(9):1800-5.
 21. Yoo SS, Wei X, Dickey CC, Guttmann CR, Panych LP. Long-term reproducibility analysis of fMRI using hand motor task. *Int J Neurosci*. 2005;115(1):55-77.
 22. Gountouna VE, Job DE, McIntosh AM, et al. Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) reproducibility and variance components across visits and scanning sites with a finger tapping task. *Neuroimage*. 2010;49(1):552-60.
 23. Mehta AD, Klein G. Clinical utility of functional magnetic resonance imaging for brain mapping in epilepsy surgery. *Epilepsy Res*. 2010;89(1):126-32.
 24. Kremneva E.I., Chernikova J.I.A., Konovalov R.N., Krotenkova M.V., Saepko I.V., Kozlovskaya I.B., Chervyakov A.V. Activation of the sensorimotor cortex with the unit for the mechanical stimulation of the foot. *Human Physiology*. 2012;38(1):61-68. (in Russian)
 25. Kremneva E.I., Chernikova J.I.A., Konovalov R.N., Krotenkova M.V., Saepko I.V., Kozlovskaya I.B., Chervyakov A.V. Evaluation of supraspinal control of locomotion in normal and pathological conditions by using passive motor fMRI paradigm. *Annals of Clinical and Experimental Neurology*. 2012;6(1):31-37. (in Russian)
 26. Polonara G, Salvolini S, Fabri M, et al. Unilateral visual loss due to ischaemic injury in the right calcarine region: a functional magnetic resonance imaging and diffusion tensor imaging follow-up study. *Int Ophthalmol*. 2011;31(2):129-34.
 27. Chen Z, Ni P, Lin Y, et al. Visual pathway lesion and its development during hyperbaric oxygen treatment: a bold-fMRI and DTI study. *J Magn Reson Imaging*. 2010;31(5):1054-60.
 28. Seghier ML, Lazeyras F, Zimine S, Saudan-Frei S, Safran AB, Huppi PS. Visual recovery after perinatal stroke evidenced by functional and diffusion MRI: case report. *BMC Neurol*. 2005; 5:17.
 29. Berg AT, Vickrey BG, Langfitt JT, et al. The multicenter study of epilepsy surgery: recruitment and selection for surgery. *Epilepsia*. 2003;44(11):1425-33. Haller S, Bartsch AJ. Pitfalls in FMRI. *Eur Radiol*. 2009;19(11): 2689-706
 30. Zijlmans M, Huiskamp G, Hersevoort M, Seppenwoolde JH, van Huffelen AC, Leijten FS. EEG-fMRI in the preoperative workup for epilepsy surgery. *Brain*. 2007;130(Pt 9):2343-53.
 31. Ives JR, Warach S, Schmitt F, Edelman RR, Schomer DL. Monitoring the patient's EEG during echo planar MRI. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1993;87(6):417-20.
 32. Zijlmans M, Huiskamp G, Hersevoort M, Seppenwoolde JH, van Huffelen AC, Leijten FS. EEG-fMRI in the preoperative workup for epilepsy surgery. *Brain*. 2007;130(Pt 9):2343-53.
 33. Bagshaw AP, Aghakhani Y, Benar CG, et al. EEG-fMRI of focal epileptic spikes: analysis with multiple haemodynamic functions and comparison with gadolinium-enhanced MR angiograms. *Hum Brain Mapp*. 2004;22(3):179-92.
 34. Vulliemoz S, Lemieux L, Daunizeau J, Michel CM, Duncan JS. The combination of EEG source imaging and EEG-correlated functional MRI to map epileptic networks. *Epilepsia*. 2010; 51 (4):491-505.