

ОРГАНИЗАЦИЯ И СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О РЕЧЕВОЙ ФУНКЦИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА: ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

А.М. Исмаилов, А.А. Зуев

ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Минздрава России; Россия, 105203 Москва, ул. Нижняя Первомайская, 70

Контакты: Алы Мехтиеви́ч Исмаилов ismailov_am@mail.ru

Введение. История изучения речевой функции головного мозга простирается с середины XIX в. Первые исследования обнаружили корковые представительства речи в головном мозге, были предложены различные теории устройства речевой функции. Технологический прорыв XX в. дал возможность изучать не только корковые отделы речевой функции, но и сложные связи белого вещества, немаловажные для практической работы нейрохирургов. По мере углубленного изучения речи были пересмотрены старые теории, выдвинуты новые. Современные методы исследования раскрыли сложность организации речи, многофункциональность речевых трактов.

Цель исследования – анализ и систематизация исторических и современных научных данных об организации речевой функции головного мозга, а также способов предоперационной оценки и интраоперационных методов идентификации речевых зон коры больших полушарий.

Материалы и методы. В результате поиска данных в интернет-ресурсе PubMed для анализа отобрано 77 статей, опубликованных между 1954 и 2020 гг.

Результаты. Исследования особенностей работы речевой функции во множестве представлены в современной научной литературе, и число публикаций растет с каждым годом. Одни исследователи прицельно изучают работы конкретного аспекта речи: корковое представительство, конкретный речевой тракт. Другие – имеют дело с общими последствиями нарушения речи после удаления опухолей, инсультов, травм. Авторской группой проведены структурирование и систематизация многочисленных данных из разнородных источников информации.

Заключение. Речевая функция головного мозга – один из наиболее сложно организованных аспектов высшей нервной деятельности центральной нервной системы, изучение которого активно продолжается во всем мире. Внедрение таких революционных методов исследования, как интраоперационное картирование коры головного мозга, магнитно-резонансная трактография, привнесло обилие новой информации касательно морфофункциональных особенностей речевой функции. Необходимы дальнейшее изучение языковой функции головного мозга и систематизация полученных данных, более глубокое понимание тонких деталей работы речевого аппарата. Продвижение в этом направлении предоставит нейрохирургам возможность избежать нежелательного неврологического дефицита в области коммуникативной способности – одной из самых важных, улучшая тем самым качество жизни пациентов.

Ключевые слова: речевая функция головного мозга, афазия, вентральный и дорзальный потоки, дугообразный пучок, верхний продольный пучок, нижний лобно-затылочный пучок, нижний продольный пучок, лобный косой пучок

Для цитирования: Исмаилов А.М., Зуев А.А. Организация и современное представление о речевой функции головного мозга: обзор литературы. Нейрохирургия 2022;24(3):80–9. DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-3-80-89

Organization and current understanding of speech function of the brain: literature review

A.M. Ismailov, A.A. Zuev

N.I. Pirogov National Medical and Surgical Center, Ministry of Health of Russia; 70 Nizhnyaya Pervomayskaya St., Moscow 105203, Russia

Contacts: Aly Mekhtievich Ismailov ismailov_am@mail.ru

Introduction. History of study of speech function of the brain has started in the middle of the 19th century. First studies discovered cortical representations of speech in the brain, proposed different theories of speech function structure. Technological breakthroughs of the 20th century allowed to study not only cortical representations of speech function but also complex connections of the white matter important for practical work of neurosurgeons. Deeper studies of speech led to revisions of the old theories, proposals of new theories. Current study methods showed complexity of speech organization, multifunctionality of speech tracts.

Aim. To analyze and systemize historical and current scientific data on organization of speech function of the brain, as well as methods of preoperative evaluation and intraoperative techniques of identification of speech zones in the cerebral cortex.

Materials and methods. As a results of data search in the PubMed database, 77 articles published between 1954 and 2020 were selected.

Results. Studies of characteristics of speech function are widely represented in current scientific literature, and their number grows every year. Some researchers study individual speech aspects: cortical representation, individual speech tracts. Others deal with general consequences of speech impediments after tumor resection, strokes, traumas. The authors cross-linked and systemized numerous data from different sources of information.

Conclusion. Speech function of the brain is one of the most complexly organized aspects of the higher nervous function, and it is being actively researched worldwide. Implementation of such revolutionary examination techniques as intraoperative mapping of the cerebral cortex, magnetic resonance tractography provided a plethora of new information on morphofunctional characteristics of speech function. Further studies of speech function of the brain and systematization of the obtained data are necessary for deeper understanding of the details of speech organs' functionality. Advances in this direction will help surgeons avoid unwanted neurological deficit in communication ability, one of the most important abilities, and improve patients' quality of life.

Keywords: speech function of the brain, aphasia, ventral and dorsal pathways, arcuate fasciculus, superior longitudinal fasciculus, inferior fronto-occipital fasciculus, inferior longitudinal fasciculus, frontal aslant tract

For citation: Ismailov A.M., Zuev A.A. Organization and current understanding of speech function of the brains: literature review. *Neurokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2022;24(3):80–9. (In Russ.). DOI: 10.17650/1683-3295-2022-24-3-80-89

ВВЕДЕНИЕ

Исторические аспекты вопроса

Первые представления об организации речевой функции головного мозга возникли в эру локализации-онизма. Пионерами в вопросах локализации речевой функции головного мозга считаются французский антрополог Р. Брока и немецкий психоневропатолог С. Wernicke, которые во второй половине XIX в. (Р. Broca, 1865; С. Wernicke, 1874) обнаружили корковые центры речевого праксиса и гнозиса. Впоследствии Р. Брока изучал данный вопрос более фундаментально и выделил нижнюю лобную извилину как участок коры головного мозга, ответственный за производство речи, названный в его честь зоной Брока. Вскоре после открытия зоны Брока С. Wernicke описал когорту пациентов с повреждениями задней части верхней височной извилины, имевшими неврологические последствия в виде нарушений понимания речи, парафазий, но с сохраненной спонтанной речью. Он предположил, что данная область имеет связи с описанным ранее Р. Брока участком коры головного мозга в нижней лобной извилине. С. Wernicke выдвинул гипотезу, что повреждение ассоциативных путей, соединяющих эти 2 зоны, приведет к возникновению «проводниковой афазии». Позже N. Geschwind подтвердил это предположение, описав серию пациентов с повреждением дугообразного пучка (arcuate fasciculus, AF), имевших нарушение повторения, но сохраненную способность к пониманию и производству речи [1]. Так родилось

классическое представление о речевой функции головного мозга и получило широкое распространение ввиду своей наглядности и незамысловатости. Со временем устоявшаяся модель устройства речи Wernicke–Geschwind подверглась критике, в первую очередь, в силу анатомической ограниченности языковых зон головного мозга и предписанных им функций — многие исследования показывают, что классические афатические расстройства могут возникать при поражении как других областей коры, так и подкорковых структур головного мозга [2–4].

АКТУАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РЕЧЕВОЙ ФУНКЦИИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Современная парадигма речевой организации представляет модель из 2 информационных потоков, каждый из которых вовлечен в определенный аспект речевого производства высшей нервной деятельности [5, 6]. Выделяют вентральный и дорзальный потоки — это группа волокон белого вещества головного мозга, соединяющих между собой определенные корковые регионы, которые имеют то или иное влияние на речевую функцию. Вентральный поток локализуется преимущественно в височном регионе и играет ключевую роль в речевом восприятии и семантической обработке. Классическим тестом на сохранность данного аспекта речевой функции служит прослушивание смысловой речи. Дорзальный поток транслирует акустическую речевую информацию в корковые регионы,

ответающие за моторное воспроизводство, артикуляцию, таким образом выполняя сенсомоторную речевую интеграцию. Тест на повторение речи служит для выявления поражений в дорзальном пучке [7]. Несмотря на множество исследований в области изучения речевой функции, остается открытым вопрос о латерализованности тех или иных аспектов речи; так, модель Hickok–Roeppel предполагает латерализованность дорзального потока в доминантном по речи полушарии и двустороннее представительство вентрального потока [6–8]. Работы с применением функциональной нейровизуализации подтвердили активацию задних отделов верхней височной извилины с обеих сторон при прослушивании речи [8]. Ряд исследований показал исключительную роль недоминантного полушария в восприятии эмоционального тона речи [9–12].

Вышеописанные особенности истории изучения речевой функции головного мозга иллюстрируют сложность морфофункциональной организации данного аспекта высшей нервной деятельности. В современной литературе существует дефицит научных публикаций, объединяющих особенности работы различных морфологических элементов речевого аппарата головного мозга. Большинство исследований использует селективный подход, изучая специфику работы конкретных трактов.

Цель исследования – получение полной, насколько это возможно на сегодняшний день, и ясной картины современного представления организации речевой функции головного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поиск научных публикаций проведен в базе PubMed. Проанализировано 77 статей, опубликованных между 1954 и 2020 гг. Основные критерии отбора статей для обзора: число пациентов в исследовании, цитируемость журнала. Ключевые поисковые слова: aphasia, human speech processing, functional anatomy of language, language area, glioma in eloquent areas, language functional magnetic resonance imaging, language representation, dorsal and ventral language streams, inferior fronto-occipital fasciculus, arcuate fasciculus, uncinat fasciculus, superior longitudinal fasciculus, middle longitudinal fasciculus, frontal aslant tract, language electrical mapping, DTI language, MRI of eloquent regions.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЧЕВОЙ ФУНКЦИИ

1. Магнитно-резонансная трактография (диффузионно-тензорная трактография). Следующим шагом стало изучение структуры ассоциативных трактов белого вещества, играющего важную роль в речевой функции. Важный вклад в изучение данного вопроса внес швейцарский анатом J. Klingler, который в 1935 г. открыл способ холодной фиксации препаратов головного мозга в формалине в течение 4–8 нед. Это позволило от-

делить волокна друг от друга и от серого вещества, что не представляется возможным на нативном препарате [13, 14].

Появление магнитно-резонансной трактографии (МР-трактография) и диффузионно-тензорной визуализации (diffusion tensor imaging, DTI) породило новую волну интереса к изучению белого вещества, поскольку МР-трактография позволяет изучать строение ассоциативных волокон в рамках предоперационной подготовки без непосредственной интервенции в структуры головного мозга (рис. 1). Эффект DTI основан на анизотропии диффузии молекул воды по аксонам нейронов, что позволяет строить тракты белого вещества [15]. Фракционная анизотропия – наиболее востребованный DTI-индекс, отражающий взаимоположение микроструктур между собой, направленность и плотность трактов белого вещества, диаметр и миелинизацию аксонов [16]. Были построены и подробнее изучены АФ, верхний продольный пучок (superior longitudinal fasciculus, SLF), нижний лобно-затылочный пучок (inferior fronto-occipital fasciculus, IFOF), нижний продольный пучок (inferior longitudinal fasciculus, ILF), крючковидный пучок (uncinate fasciculus, UF), открыты лобный косой пучок (frontal aslant tract, FAT) и средний продольный пучок [17]. Однако DTI имеет свои ограничения, поскольку построение тракта, компримируемого опухолью или плохо функционирующего, вызывает определенные трудности [18]. Исследования,

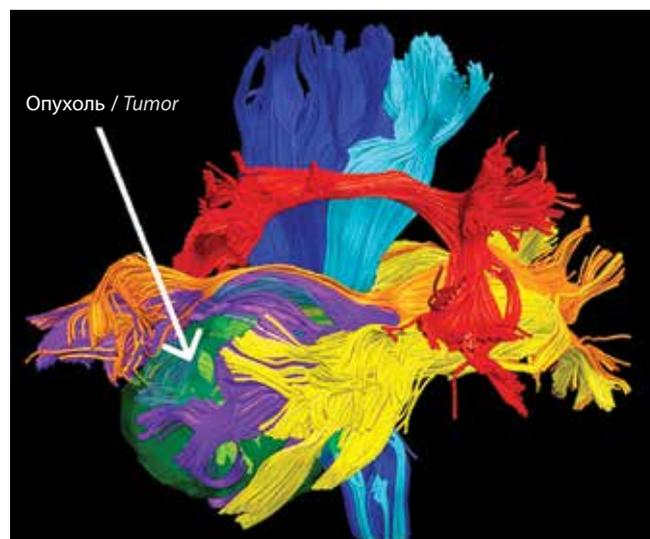


Рис. 1. Трехмерная пространственная реконструкция взаиморасположения опухоли, компримирующей проводящие пути головного мозга (стрелка), и проводящих путей белого вещества головного мозга; пирамидный тракт (синим и голубым); дугообразный пучок (красным); нижний продольный пучок (желтым); нижний лобно-затылочный пучок (оранжевым), U-волокна – пути, соединяющие корковые нейроны соседних извилин (фиолетовым)

Fig. 1. 3D reconstruction of mutual arrangement of the tumor compromising conduction tracts of the brain (arrow) and conduction tracts of the white matter; pyramidal tract (blue and light blue); arcuate fasciculus (red); inferior longitudinal fasciculus (yellow); inferior fronto-occipital fasciculus (orange), U-fibers – pathways connecting cortical neurons of the neighboring gyri (violet)

сравнивающие данные предоперационной подготовки с DTI-реконструкцией трактов и прямой интраоперационной электростимуляцией, показывают вариабельные результаты; в ряде случаев совпадение стимуляции с DTI-данными наблюдалось в 80 % случаев [19]. Другие данные указывают на специфическую высокую чувствительность к определенным трактам: совпадение с SLF отмечено в 98 %, с IFOF – в 89 % случаев [20]. Кроме того, использование DTI-трактографии в нейронавигации может иметь свои погрешности, в том числе из-за смещения структур головного мозга во время операции [21].

2. Интраоперационное картирование. Внедрение интраоперационного картирования канадским нейрохирургом W. Penfield в 1937 г. открыло новую эпоху в хирургии эпилепсии и опухолей, локализованных в функционально значимых зонах (ФЗЗ) коры головного мозга. Прямая электрическая стимуляция коры служит уникальным способом изучения особенностей коркового представительства речи в каждом конкретном случае [22, 23]. Электрическое картирование обычно проводилось параллельно с предъявлением пациенту задач на счет, письмо, называние предметов, чтение. При положительном ответе зона мозга отмечалась стерильным пронумерованным маркером (рис. 2). Разработанная W. Penfield в первой половине XX в. техника краниотомии с пробуждением в значительной степени сохранила свой изначальный вид с минимальными дополнениями спустя более чем

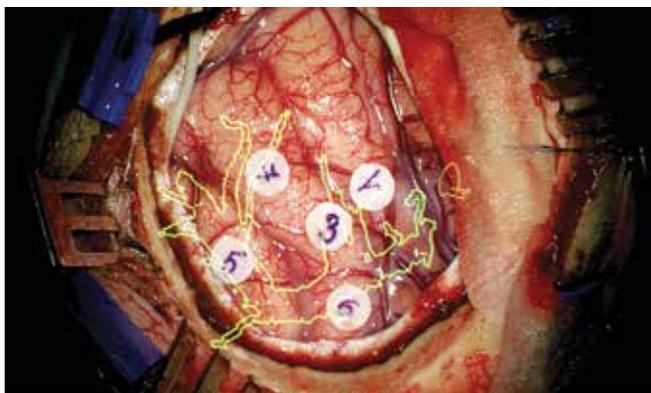


Рис. 2. Операция с пробуждением и интраоперационным картированием речевых зон лобной доли головного мозга в режиме дополненной реальности (интеграция данных предоперационной магнитно-резонансной трактографии с нейронавигацией и микроскопом). Положительные участки тестирования (ошибки, остановка речи, парафазии и т. д.) при электрической стимуляции коры головного мозга обозначены пронумерованными бумажками. Проекция дугообразного пучка на кору головного мозга (режим дополненной реальности) выделена желтым контуром

Fig. 2. Operation with awakening and intraoperative mapping of speech zones of the frontal lobe in the augmented reality mode (integration of preoperative magnetic resonance tractography with neuronavigation and microscope). Positive testing areas (errors, speech arrest, paraphasia, etc.) during electric stimulation of the cerebral cortex are marked with enumerated papers. Projection of the arcuate fasciculus on the cerebral cortex (augmented reality mode) is shown in yellow contour

70 лет. W. Penfield описал следующие виды речевого нарушения, обнаруженные им при стимуляции перисильвиевого региона в левом полушарии: тотальная остановка речи, повторения, спутанность и т. д. [23]. Стимуляция покрышечной области, прецентральной борозды, височно-теменной области в левом полушарии вызывали полную остановку речи; для правого полушария такие регионы были обнаружены только в пределах покрышечной части головного мозга. Однако значительная часть речевых ошибок разного порядка возникала при стимуляции задней части нижней лобной извилины, задней части височной и нижней теменной областей [24–26].

Интраоперационное картирование ФЗЗ обрело широкую популярность в нейрохирургии, и множество исследований на базе данной техники отражает крайне сложную организацию языковой функции, в значительной степени отличную от ранее описанных моделей. Лингвистическое представительство может серьезно различаться в каждом конкретном случае, что не представляется возможным предсказать перед операцией. Из-за анатомических различий крайне важными и обязательными процедурами для качественной и безопасной работы в пределах языковых зон служат операции с пробуждением, стимуляция коры и картирование. Медленно растущие опухоли с инфильтрирующими свойствами, такие как глиомы низкой степени злокачественности, могут вызывать реорганизацию коры, перераспределение ФЗЗ, которые могут располагаться в пределах опухоли, в окружающей паренхиме или даже в противоположном полушарии [27, 28]. По данным литературы, операции с картированием ФЗЗ уменьшают выраженность послеоперационного неврологического дефицита, позволяя выполнять тотальное удаление опухолей [29].

Стимуляция помогает определить четкие функциональные границы (около 1 см²), за пределами которых обычно ответа на раздражение нет. Предоперационные методы картирования не дают такой точной информации. Например, сравнение данных функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и стимуляции коры (ответы на одни и те же раздражители) показало более размытые и широкие границы в первом случае. Благодаря стимуляции представляется возможным определить участки коры с определяющей ролью, а фМРТ дает информацию о прилежащих зонах, только лишь вовлеченных в функцию, повреждение которых не носит критический характер. Таким образом, риск послеоперационного языкового дефицита определенно коррелирует с повреждением позитивных зон стимуляции, но не обязательно совпадает с зонами, найденными при фМРТ. По данным литературы, резекция, выполненная на расстоянии 1 см от позитивных при стимуляции зон, не вызвала постоянного речевого дефицита в отличие от хирургической техники, не учитывающей эти позитивные зоны [30, 31].

При сравнении результатов фМРТ и прямой электростимуляции коры сделаны выводы о предсказательной силе фМРТ: данные совпадали в диапазоне от 29 до 52 % случаев [32–34]. Функциональная нейровизуализация значительно лучше справляется с задачей латерализации языковой функции, чем с определениями границ функциональных зон.

Семантические ошибки (замена целевого слова на другое существующее слово, связанное с целевым по смыслу) возникают при стимуляции задних отделов средней височной, надкраевой и нижней лобной извилин. Фонологические парафазии (замена звука в слове), неологизмы (несуществующие, новообразованные слова) и циркулокуции (описательный поиск слова) могут возникать при раздражении в области верхней височной борозды [35, 36]. Визуальные парафазии (существующее слово, обозначающее предмет, зрительно схожий с предъявляемым изображением) возникают при стимуляции базальных отделов затылочно-височной коры [37]. При картировании верхней височной извилины можно получить полную остановку речи, что определяет ее значительную роль в финальной речевой интеграции до момента генерации моторных импульсов в лобной доле. Однако анартрия (феномен полной остановки речи) может быть достигнута и при раздражении прецентральной извилины, лобной покрывчатой части, височно-теменного сочленения. W. Penfield даже описал участки коры головного мозга в правой гемисфере, вызывающие анартрию при прямой электростимуляции, однако только в области лобной покрывки. Обнаружено, что роль задней нижней и центральной средней височных извилин заключается в назывании изображений. Чтение может быть прервано в средней височной извилине и нижней теменной доле [38]. Картирование коры билингвальных пациентов свидетельствует о существовании как общих, так и различных представительства коры для 2 языков [39]. Поэтому таким пациентам

требуется картировать все участки коры, отвечающие за экспрессию обоих языков.

АНАТОМО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РЕЧЕВЫХ ТРАКТОВ БЕЛОГО ВЕЩЕСТВА

1. Вентральный поток

Верхний продольный пучок. Тракты белого вещества в структуре дорзального потока – SLF и AF. Верхний продольный пучок включает в себя 3 сегмента:

- дорзальный, соединяющий угловую извилину со средней и верхней лобными извилинами;
- вентральный, начинающийся от надкраевой извилины и заканчивающийся в средней и нижней лобных извилинах;
- задний, соединяющий зоны верхней и нижней теменных долек с задними отделами верхней и средней височных извилин.

В функциональном отношении SLF отвечает за визуально-пространственное внимание (дорзальный сегмент) [40, 41]; артикуляцию, восприятие речи, двигательное планирование (вентральный сегмент) [42, 43]; поиск соответствующей лексической единицы, фонологическое формирование слова (задний сегмент) [44]. Прямая электрическая стимуляция SLF приводит к ошибкам повторения, нарушениям артикуляции [45, 46]. Спектр неврологических нарушений при нарушении целостности волокон SLF широк и включает в себя оптическую атаксию, явления апраксии, аграфию, мнестические нарушения [41, 47–49], аномию, алексию [50, 51], синдром неглекта или левостороннее пространственное игнорирование [52, 53].

Дугообразный пучок. Известно, что AF – самый массивный речевой тракт, соединяющий слуховую область коры с задними отделами нижней и средней лобных извилин. Анатомически AF подразделяется на длинный и задний сегменты (рис. 3). Также его называют фонологическим потоком, AF играет важную

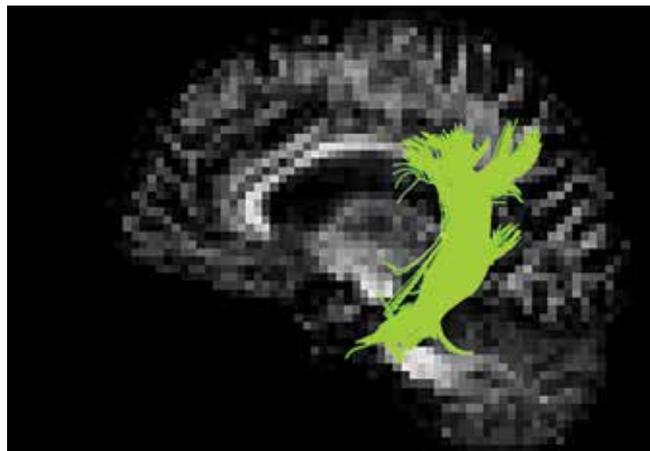
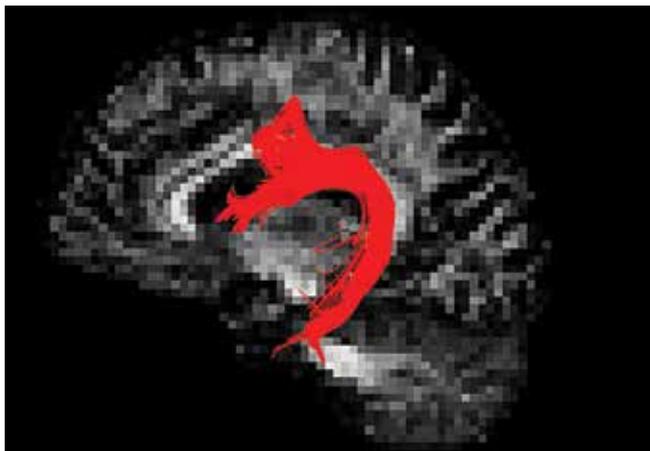


Рис. 3. Магнитно-резонансная трактография. Визуализация дугообразного пучка (длинный сегмент – красным, задний сегмент – зеленым)
 Fig. 3. Magnetic resonance tractography. Visualization of the arcuate fasciculus (long segment – red, posterior segment – green)

роль в обработке речевой информации [54]. Ряд авторов относят к функциям АФ вербальную рабочую память [28] и беглость [49]. При прямой интраоперационной электростимуляции АФ возникают фонологические парафазии [54]. Недоминантный АФ играет немаловажную роль в процессах социальной познавательной деятельности: интерпретации мимики, выражений лица, взгляда и других невербальных способах коммуникации [55, 56]. Кроме того, правый АФ участвует в процессах удержания внимания (включая сложные задачи визуального поиска), таких как идентификация и акцентирование внимания, игнорирование помех [57, 58]. Интересно, что аномалии развития правого АФ приводят к явлениям амузии [59].

2. Дорзальный поток

Синтаксическая и семантическая обработка речи — часть функций вентрального пути, который включает в себя IFOF, ILF и UF.

Нижний лобно-затылочный пучок. Известно, что IFOF — крупный ассоциативный пучок белых волокон, простирающийся от нижней и средней лобных извилин к задней части теменной и затылочной долей головного мозга (рис. 4); IFOF имеет 3 сегмента: вертикальный (IFOF-1), локализованный в лобной доле, и 2 горизонтальных, один из которых также располагается в лобной доле (IFOF-2), а другой — начинается от порога островка, проникает в височную, проходит через теменную и заканчивается непосредственно в затылочной доле (IFOF-3). Научная парадигма первоначальную функциональную роль IFOF отводит семантическому процессингу, однако ряд авторов считают функциональный потенциал данного тракта более комплексным. Так, А.К. Сонег и соавт. (2018) полагают, что IFOF соединяет нейронные сети значимости биологического поведения с центрами его

реализации, играя немаловажную роль в мотивации и цель-ориентированном поведении [60], внимании и даже в аффективном поведении [61]. Другие исследования указывают на высокую частоту мнестических нарушений после удаления глиом островка, по-видимому, связанных с деструкцией волокон IFOF, отмечая недооцененную роль данного тракта в нейробиологии памяти. Изучение прямой интраоперационной электростимуляции IFOF на глубине верхней височной извилины подтверждает высокую частоту семантических парафазий [62].

Нижний продольный пучок. Располагается ILF ниже IFOF и представляет собой тракт белого вещества, соединяющий затылочно-височный регион с передними отделами височной доли головного мозга (рис. 5). Анатомически ILF известен еще с первой половины XIX в. (J.C. Reil, 1812; K.F. Burdach, 1822), однако его функциональная роль остается до сих пор дискуссионной. Однозначна роль ILF в визуальной интерпретации объектов, что подтверждается в исследованиях с интраоперационной стимуляцией тракта, которая вызывала транзиторную зрительную гемиагнозию [63]. Имеются сведения о роли ILF в семантической обработке речевой информации и лексическом поиске. Так, при DTI-исследованиях у пациентов с обеднением волокон левого ILF обнаружены нарушения в лексико-семантическом аспекте речеобразования [64]. Изучение речевой функции у пациентов с рассеянным склерозом (очаг в структуре ILF) подтверждают эти данные [65].

Крючковидный пучок. Роль UF в языковой функции остается дискуссионной. Анатомически UF соединяет полюс височной доли с нижней лобной извилиной (рис. 6), а функционально, как предполагается,

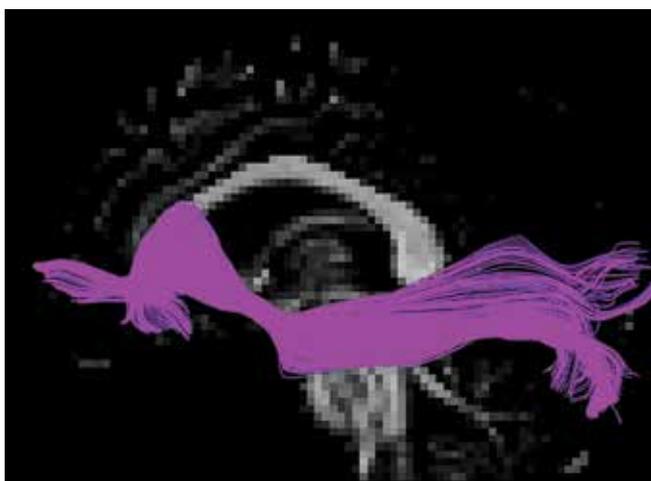


Рис. 4. Магнитно-резонансная трактография. Визуализация нижнего лобно-затылочного пучка

Fig. 4. Magnetic resonance tractography. Visualization of the inferior fronto-occipital fasciculus

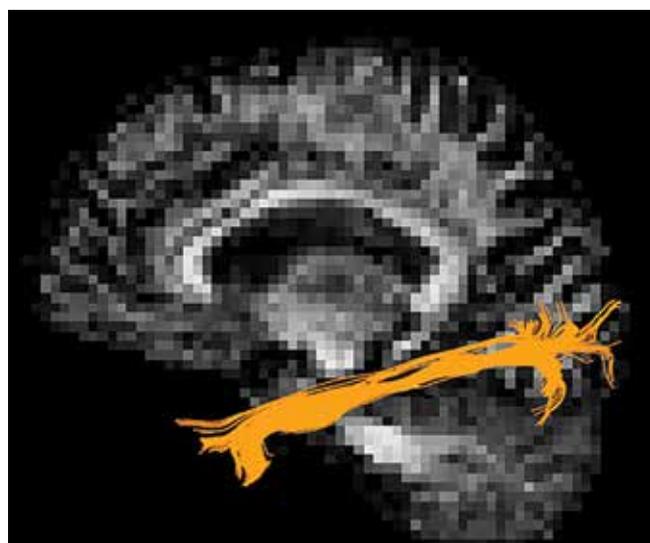


Рис. 5. Магнитно-резонансная трактография. Визуализация нижнего продольного пучка

Fig. 5. Magnetic resonance tractography. Visualization of the inferior longitudinal fasciculus

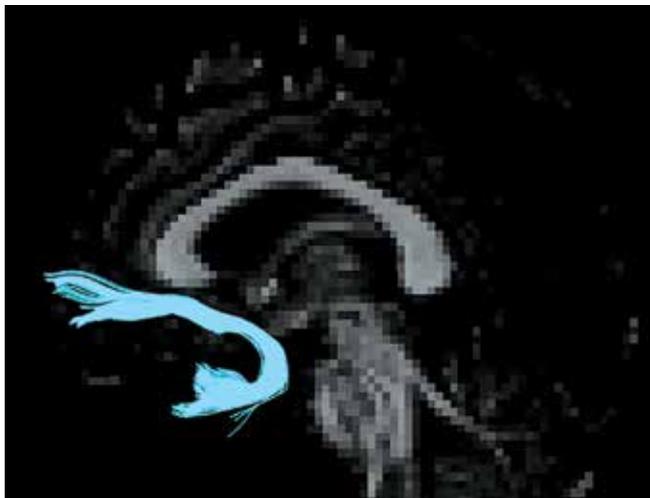


Рис. 6. Магнитно-резонансная трактография. Визуализация крючко-видного пучка

Fig. 6. Magnetic resonance tractography. Visualization of the uncinate fasciculus

вносит свой вклад в семантическую организацию языка. В одном исследовании при повреждении UF у пациентов возникали трудности называния имен знаменитых людей [66], в другом — подобных нарушений не наблюдалось [67].

3. Лобный косой пучок

Лобный косой пучок (FAT) — тракт, соединяющий нижнюю лобную извилину с регионом дополнительной моторной коры (рис. 7); FAT играет определяющую роль в инициации речи [68–70]. Первое упоминание об этом пучке датируется 2007 г.: A. R. Aron и соавт. описали его, однако не дали названия [71]. В дальнейшем FAT был подробно описан в других исследованиях белого вещества в рамках МР-трактографии. Анатомически FAT соединяет участок нижней лобной извилины с медиальной частью верхней лобной извилины. Интраоперационная стимуляция FAT влечет за собой нарушения различного характера, включая заикание [72] и остановку речи [73]. В работах по сравнению послеоперационных проявлений повреждения FAT и лобно-полосатого пучка выявлены транзиторные нарушения инициации речи для FAT и аналогичные отклонения касательно движений тела для лобно-полосатого пучка [74, 75]. Нарушение целостности FAT приводит к таким последствиям, как снижение либо отсутствие спонтанной речи, семантическая и фонетическая девиация, затруднение поиска глаголов [49, 74, 76]. В исследованиях с поражением дополнительной моторной коры и нижней лобной извилины

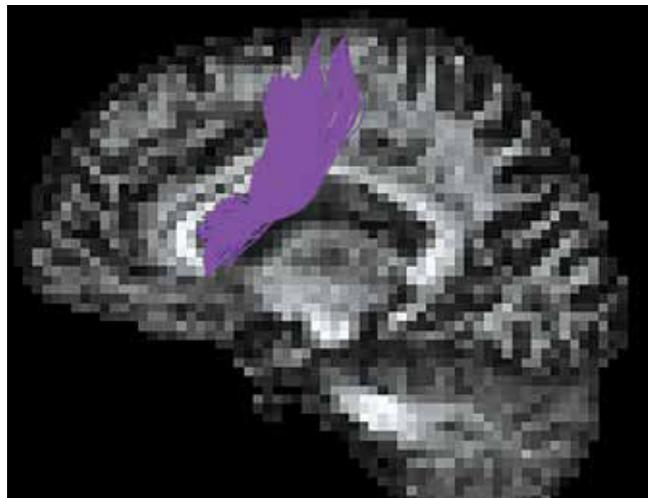


Рис. 7. Магнитно-резонансная трактография. Визуализация лобного косого пучка

Fig. 7. Magnetic resonance tractography. Visualization of the frontal aslant tract

наблюдались речевые нарушения, подобные тем, которые возникают при повреждении FAT, что подтверждает их анато-мо-функциональную связь [77].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Речевая функция головного мозга крайне сложно устроена и требует дальнейшего изучения. Открытая во второй половине XX в. (W. Penfield) революционная идея — картирование ФЗЗ головного мозга электрической стимуляцией корковых структур во время интраоперационного пробуждения — породила новую парадигму в нейрохирургии. Благодаря внедрению МР-трактографии открыты новые ассоциативные тракты, появилась возможность подробно изучать проводящие пути на предоперационном этапе. На сегодняшний день МР-трактография и интраоперационное картирование ФЗЗ — неотъемлемые составляющие хирургии эпилепсии и нейроонкологии. С учетом пластических свойств головного мозга и его способности к реорганизации применение электростимуляции в ряде случаев — крайне необходимая процедура: она повышает безопасность проведения операций, значительно снижает вероятность послеоперационного дефицита, увеличивает степень резекции опухолей. Необходимы дальнейшее изучение языковой функции головного мозга и систематизация полученных данных. Продвижение в этом направлении предоставит нейрохирургам возможность избежать нежелательного неврологического дефицита в области коммуникативной способности — одной из самых важных, улучшая тем самым качество жизни пациентов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Geschwind N. Disconnexion syndromes in animals and man. I. *Brain* 1965;88(2):237–94. DOI: 10.1093/brain/88.2.237
- Tanabe H., Sawada T., Inoue N. et al. Conduction aphasia and arcuate fasciculus. *Acta Neurol Scand* 1987;76(6):422–7. DOI: 10.1111/j.1600-0404.1987.tb03597.x
- Mohr J.P., Pessin M.S., Finkelstein S. et al. Broca aphasia: Pathologic and clinical. *Neurology* 1978;28(4):311–24. DOI: 10.1212/wnl.28.4.311
- Hickok G., Erhard P., Kassubek J. A functional magnetic resonance imaging study of the role of left posterior superior temporal gyrus in speech production: Implications for the explanation of conduction aphasia. *Neurosci Lett* 2000;87(2):156–60. DOI: 10.1016/S0304-3940(00)01143-5
- Rauschecker J.P., Scott S.K. Maps and streams in the auditory cortex: Nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nat Neurosci* 2009;12:718–24. DOI: 10.1038/nn.2331
- Hickok G., Poeppel D. Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition* 2004;92(1–2):67–99. DOI: 10.1016/j.cognition.2003.10.011
- Damasio A.R. Aphasia. *N Engl J Med* 1992;326(8):531–9. DOI: 10.1056/NEJM199202203260806
- Rauschecker J.P., Scott S.K. Maps and streams in the auditory cortex: Nonhuman primates illuminate human speech processing. *Nat Neurosci* 2009;12(6):718–24. DOI: 10.1038/nn.2331
- Buchanan T.W., Lutz K., Mirzazade S. et al. Recognition of emotional prosody and verbal components of spoken language: An fMRI study. *Brain Res Cogn Brain Res* 2000;9(3):227–38. DOI: 10.1016/S0926-6410(99)00060-9
- George M.S., Parekh P.I., Rosinsky N. et al. Understanding emotional prosody activates right hemisphere regions. *Arch Neurol* 1996;53(7):665–70. DOI: 10.1001/archneur.1996.00550070103017
- Imaizumi S., Mori K., Kiritani S. et al. Vocal identification of speaker and emotion activates different brain regions. *Neuroreport* 1997;8(12):2809–12. DOI: 10.1097/00001756-199708180-00031
- Pell M.D. Fundamental frequency encoding of linguistic and emotional prosody by right hemisphere-damaged speakers. *Brain Lang* 1999;69(2):161–92. DOI: 10.1006/brln.1999.2065
- Agrawal A., Kapfhammer J.P., Kress A. et al. Josef Klingler's models of white matter tracts: influences on neuroanatomy, neurosurgery, and neuroimaging. *Neurosurgery* 2011;69(2):238–52; discussion 252–4. DOI: 10.1227/NEU.0b013e318214ab79
- Axer H., Klingner C.M., Prescher A. Fiber anatomy of dorsal and ventral language streams. *Brain Lang* 2013;127(2):192–204. DOI: 10.1016/j.bandl.2012.04.015
- Moseley M.E., Cohen Y., Kucharczyk J. et al. Diffusion-weighted MR imaging of anisotropic water diffusion in cat central nervous system. *Radiology* 1990;176(2):439–45. DOI: 10.1148/radiology.176.2.2367658
- Kochunov P., Thompson P.M., Lancaster J.L. et al. Relationship between white matter fractional anisotropy and other indices of cerebral health in normal aging: Tract-based spatial statistics study of aging. *Neuroimage* 2007;35(2):478–87. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.12.021
- de Benedictis A., Duffau H., Paradiso B. et al. Anatomic-functional study of the temporo-parieto-occipital region: Dissection, tractographic and brain mapping evidence from a neurosurgical perspective. *J Anat* 2014;225(2):132–51. DOI: 10.1111/joa.12204
- Leclercq D., Duffau H., Delmaire C. et al. Comparison of diffusion tensor imaging tractography of language tracts and intraoperative subcortical stimulations. *J Neurosurg* 2010;112(3):503–11. DOI: 10.3171/2009.8.JNS09558
- Meyer L., Cunitz K., Obleser J., Friederici A.D. Sentence processing and verbal working memory in a white-matter-disconnection patient. *Neuropsychologia* 2014;61:190–6. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2014.06.014
- Bello L., Gambini A., Castellano A. et al. Motor and language DTI Fiber Tracking combined with intraoperative subcortical mapping for surgical removal of gliomas. *Neuroimage* 2008;39(1):369–82. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.08.031
- Nimsky C., Ganslandt O., Hastreiter P. et al. Intraoperative diffusion-tensor MR imaging: Shifting of white matter tracts during neurosurgical procedures – initial experience. *Radiology* 2005;234(1):218–25. DOI: 10.1148/radiol.2341031984
- Penfield W. Combined regional and general anesthesia for craniotomy and cortical exploration. I. Neurosurgical considerations. *Curr Res Anesth Analg* 1954;33(3):145–55.
- Penfield W., Roberts L. *Speech and Brain-Mechanisms*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1959. 302 p.
- Lee Y.S., Lueders H., Dinner D.S. et al. Recording of auditory evoked potentials in man using chronic subdural electrodes. *Brain* 1984;107(Pt 1):115–31. DOI: 10.1093/brain/107.1.115
- Lesser R.P., Lueders H., Dinner D.S. et al. The location of speech and writing functions in the frontal language area. Results of extraoperative cortical stimulation. *Brain* 1984;107(Pt 1):275–91. DOI: 10.1093/brain/107.1.275
- Duffau H., Moritz-Gasser S., Mandonnet E. et al. A re-examination of neural basis of language processing: Proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming. *Brain Lang* 2014;131:1–10. DOI: 10.1016/j.bandl.2013.05.011
- Benzagmout M., Gatignol P., Duffau H. Resection of World Health Organization Grade II gliomas involving Broca's area: Methodological and functional considerations. *Neurosurgery* 2007;61(4):741–52; discussion 752–3. DOI: 10.1227/01.NEU.0000298902.69473.77
- Krainik A., Duffau H., Capelle L. Role of the healthy hemisphere in recovery after resection of the supplementary motor area. *Neurology* 2004;62(8):1323–32. DOI: 10.1212/01.wnl.0000120547.83482.b1
- de Witt Hamer P.C., Moritz-Gasser S., Gatignol P., Duffau H. Is the human left middle longitudinal fascicle essential for language? A brain electrostimulation study. *Hum Brain Mapp* 2011;32(6):962–73. DOI: 10.1002/hbm.21082
- Gil-Robles S., Duffau H. Surgical management of World Health Organization Grade II gliomas in eloquent areas: the necessity of preserving a margin around functional structures. *Neurosurg Focus* 2010;28(2):E8. DOI: 10.3171/2009.12.FOCUS09236
- Haglund M.M., Berger M.S., Shamseldin M. et al. Cortical localization of temporal lobe language sites in patients with gliomas. *Neurosurgery* 1994;34(4):567–76; discussion 576. DOI: 10.1227/00006123-199404000-00001
- 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. *Neurosurgery* 2003;52(6):1335–45; discussion 1345–7. DOI: 10.1227/01.neu.0000064803.05077.40
- Rutten G.J.M., Ramsey N.F., van Rijen P.C. et al. Development of a functional magnetic resonance imaging protocol for intraoperative localization of critical temporoparietal language areas. *Ann Neurol* 2002;51(3):350–60. DOI: 10.1002/ana.10117
- Spena G., Nava A., Cassini F. Preoperative and intraoperative brain mapping for the resection of eloquent-area tumors. A prospective analysis of methodology, correlation, and usefulness based on clinical outcomes. *Acta Neurochir (Wien)* 2010;152(11):1835–46. DOI: 10.1007/s00701-010-0764-9
- Bello L., Gallucci M., Fava M. et al. Intraoperative subcortical language tract mapping guides surgical removal of gliomas involving speech areas. *Neurosurgery* 2007;60(1):67–80; discussion 80–2. DOI: 10.1227/01.NEU.0000249206.58601.DE
- Corina D.P., Loudermilk B.C., Detwiler L. et al. Analysis of naming errors during cortical stimulation mapping: Implications

- for models of language representation. *Brain Lang* 2010;115(2):101–12. DOI: 10.1016/j.bandl.2010.04.001
37. Mandonnet E., Gatignol P., Duffau H. Evidence for an occipito-temporal tract underlying visual recognition in picture naming. *Clin Neurol Neurosurg* 2009;111(7):601–5. DOI: 10.1016/j.clineuro.2009.03.007
 38. Schwartz T.H., Devinsky O., Doyle W., Perrine K. Function-specific high-probability “nodes” identified in posterior language cortex. *Epilepsia* 1999;40(5):575–83. DOI: 10.1111/j.1528-1157.1999.tb05559.x
 39. Lucas 2nd T.H., McKhann 2nd G.M., Ojemann G.A. Functional separation of languages in the bilingual brain: a comparison of electrical stimulation language mapping in 25 bilingual patients and 117 monolingual control patients. *J Neurosurg* 2004;101(3):449–57. DOI: 10.3171/jns.2004.101.3.0449
 40. Shulman G.L., Pope D.L.W., Astafiev S.V. Right hemisphere dominance during spatial selective attention and target detection occurs outside the dorsal frontoparietal network. *J Neurosci* 2010;30(10):3640–51. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4085-09.2010
 41. Karnath H.-O., Perenin M.-T. Cortical control of visually guided reaching: Evidence from patients with optic ataxia. *Cereb Cortex* 2005;15(10):1561–9. DOI: 10.1093/cercor/bhi034
 42. Kellmeyer P., Ziegler W., Peschke C. et al. Fronto-parietal dorsal and ventral pathways in the context of different linguistic manipulations. *Brain Lang* 2013;127(2):241–50. DOI: 10.1016/j.bandl.2013.09.011
 43. Goranskaya D., Kreitewolf J., Mueller J.L. et al. Fronto-parietal contributions to phonological processes in successful artificial grammar learning. *Front Hum Neurosci* 2016;10:551. DOI: 10.3389/fnhum.2016.00551
 44. Herbert G., Moritz-Gasser S., Boisseau M. et al. Converging evidence for a cortico-subcortical network mediating lexical retrieval. *Brain* 2016;139(11):3007–21. DOI: 10.1093/brain/aww220
 45. van Geemen K., Herbert G., Moritz-Gasser S., Duffau H. Limited plastic potential of the left ventral premotor cortex in speech articulation: Evidence from intraoperative awake mapping in glioma patients. *Hum Brain Mapp* 2014;35(4):1587–96. DOI: 10.1002/hbm.22275
 46. Maldonado I.L., Moritz-Gasser S., Duffau H. Does the left superior longitudinal fascicle subserve language semantics? A brain electrostimulation study. *Brain Struct Funct* 2011;216(3):263–74. DOI: 10.1007/s00429-011-0309-x
 47. Timpert D.C., Weiss P.H., Vössel S. et al. Apraxia and spatial inattention dissociate in left hemisphere stroke. *Cortex* 2015;71:349–58. DOI: 10.1016/j.cortex.2015.07.023
 48. Kinoshita M., Nakajima R., Shinohara H. et al. Chronic spatial working memory deficit associated with the superior longitudinal fasciculus: a study using voxel-based lesion-symptom mapping and intraoperative direct stimulation in right prefrontal glioma surgery. *J Neurosurg* 2016;125(4):1024–32. DOI: 10.3171/2015.10.JNS1591
 49. Li M., Zhang Y., Song L. et al. Structural connectivity subserving verbal fluency revealed by lesion-behavior mapping in stroke patients. *Neuropsychologia* 2017;101:85–96. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.05.008
 50. Sarubbo S., de Benedictis A., Merler S. et al. Towards a functional atlas of human white matter. *Hum Brain Mapp* 2015;36(8):3117–36. DOI: 10.1002/hbm.22832
 51. Zemmoura I., Herbert G., Moritz-Gasser S. et al. New insights into the neural network mediating reading processes provided by cortico-subcortical electrical mapping. *Hum Brain Mapp* 2015;36(6):2215–30. DOI: 10.1002/hbm.22766
 52. Toba M.N., Migliaccio R., Batrancourt B. et al. Common brain networks for distinct deficits in visual neglect. A combined structural and tractography MRI approach. *Neuropsychologia* 2018;115:167–78. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2017.10.018
 53. Bartolomeo P., Thiebaut de Schotten M., Doricchi F. et al. Left unilateral neglect as a disconnection syndrome. *Cereb Cortex* 2007;17(11):2479–90. DOI: 10.1093/cercor/bhl181
 54. Maldonado I.L., Moritz-Gasser S., de Champfleury N.M. et al. Surgery for gliomas involving the left inferior parietal lobule: New insights into the functional anatomy provided by stimulation mapping in awake patients. *J Neurosurg* 2011;115(4):770–9. DOI: 10.3171/2011.5.JNS112
 55. Herbert G., Lafargue G., Bonnetblanc F. et al. Inferring a dual-stream model of mentalizing from associative white matter fibres disconnection. *Brain* 2014;137(Pt 3):944–59. DOI: 10.1093/brain/awt370
 56. Nakajima R., Yordanova Y.N., Duffau H. et al. Neuropsychological evidence for the crucial role of the right arcuate fasciculus in the face-based mentalizing network: a disconnection analysis. *Neuropsychologia* 2018;115:179–87. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.024
 57. Hattori T., Ito K., Nakazawa C. et al. Structural connectivity in spatial attention network: Reconstruction from left hemispatial neglect. *Brain Imaging Behav* 2018;12(2):309–23. DOI: 10.1007/s11682-017-9698-7
 58. Suchan J., Umarova R., Schnell S. et al. Fiber pathways connecting cortical areas relevant for spatial orienting and exploration. *Hum Brain Mapp* 2014;35(3):1031–43. DOI: 10.1002/hbm.22232
 59. Chen X., Zhao Y., Zhong S. et al. The lateralized arcuate fasciculus in developmental pitch disorders among mandarin amusics: Left for speech and right for music. *Brain Struct Funct* 2018;223(4):2013–24. DOI: 10.1007/s00429-018-1608-2
 60. Conner A.K., Briggs R.G., Sali G. et al. A Connectomic Atlas of the Human Cerebrum-Chapter 13: Tractographic description of the inferior fronto-occipital fasciculus. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 2018;15(Suppl 1):S436–43. DOI: 10.1093/ons/opy267
 61. Zhang J., Wei X., Xie S. et al. Multifunctional roles of the ventral stream in language models: Advanced segmental quantification in post-stroke aphasic patients. *Front Neurol* 2018;9:89. DOI: 10.3389/fneur.2018.00089
 62. Martino J., de Lucas E.M. Subcortical anatomy of the lateral association fascicles of the brain: a review. *Clin Anat* 2014;27(4):563–9. DOI: 10.1002/ca.22321
 63. Gil-Robles S., Carvallo A., del Mar Jimenez M. et al. Double dissociation between visual recognition and picture naming: a study of the visual language connectivity using tractography and brain stimulation. *Neurosurgery* 2013;72(4):678–86. DOI: 10.1227/NEU.0b013e318282a361
 64. Mandelli M.L., Caverzasi E., Binney R.J. et al. Frontal white matter tracts sustaining speech production in primary progressive aphasia. *J Neurosci* 2014;34(29):9754–67. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3464-13.2014
 65. Agosta F., Henry R.G., Migliaccio R. et al. Language networks in semantic dementia. *Brain* 2010;133(Pt 1):286–99. DOI: 10.1093/brain/awp233
 66. Papagno C., Miracapillo C., Casarotti A. et al. What is the role of the uncinate fasciculus? Surgical removal and proper name retrieval. *Brain* 2011;134(Pt 2):405–14. DOI: 10.1093/brain/awq283
 67. Duffau H., Gatignol P., Moritz-Gasser S., Mandonnet E. Is the left uncinate fasciculus essential for language? A cerebral stimulation study. *J Neurol* 2009;256(3):382–9. DOI: 10.1007/s00415-009-0053-9
 68. Catani M., Dell’acqua F., Vergani F. et al. Short frontal lobe connections of the human brain. *Cortex* 2012;48(2):273–91. DOI: 10.1016/j.cortex.2011.12.001
 69. Catani M., Mesulam M., Jakobsen E. et al. A novel frontal pathway underlies verbal fluency in primary progressive aphasia. *Brain* 2013;136(Pt 8):2619–28. DOI: 10.1093/brain/awt163
 70. Thiebaut de Schotten M., Dell’acqua F., Valabregue R., Catani M. Monkey to human comparative anatomy of the frontal lobe association tracts. *Cortex* 2012;48(1):82–96. DOI: 10.1016/j.cortex.2011.10.001
 71. Aron A.R., Behrens T.E., Smith S. et al. Triangulating a cognitive control network using diffusion-weighted magnetic resonance

- imaging (MRI) and functional MRI. *J Neurosci* 2007;27(14):3743–52. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0519-07.2007
72. Kemerdere R., de Champfleury N.M., Deverdun J. et al. Role of the left frontal aslant tract in stuttering: a brain stimulation and tractographic study. *J Neurol* 2016;263(1):157–67. DOI: 10.1007/s00415-015-7949-3
73. Vassal F., Boutet C., Lemaire J.-J., Nuti C. New insights into the functional significance of the frontal aslant tract: An anatomofunctional study using intraoperative electrical stimulations combined with diffusion tensor imaging-based fiber tracking. *Br J Neurosurg* 2014;28(5):685–7. DOI: 10.3109/02688697.2014.889810
74. Kinoshita M., de Champfleury N.M., Deverdun J. et al. Role of fronto-striatal tract and frontal aslant tract in movement and speech: An axonal mapping study. *Brain Struct Funct* 2015;220(6):3399–412. DOI: 10.1007/s00429-014-0863-0
75. Fujii M., Maesawa S., Motomura K. et al. Intraoperative subcortical mapping of a language-associated deep frontal tract connecting the superior frontal gyrus to Broca's area in the dominant hemisphere of patients with glioma. *J Neurosurg* 2015;122(6):1390–6. DOI: 10.3171/2014.10.JNS14945
76. Chernoff B.L., Teghipco A., Garcea F.E. et al. A role for the frontal aslant tract in speech planning: a neurosurgical case study. *J Cogn Neurosci* 2018;30(5):752–69. DOI: 10.1162/jocn_a_01244
77. Zyryanov A., Malyutina S., Dragoy O. Left frontal aslant tract and lexical selection: Evidence from frontal lobe lesions. *Neuropsychologia* 2020;147:107385. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2020.107385

Вклад авторов

А.М. Исмаилов: разработка дизайна исследования, обработка данных, написание статьи;

А.А. Зуев: разработка дизайна исследования, научное редактирование статьи.

Authors' contributions

A.M. Ismailov: research design of the study, обзор литературы, literature review, data analysis, article writing;

A.A. Zuev: research design of the study, scientific editing of the article.

ORCID авторов / ORCID of authors

А.М. Исмаилов / A.M. Ismailov: <https://orcid.org/0000-0002-4506-0256>

А.А. Зуев / A.A. Zuev: <https://orcid.org/0000-0003-2974-1462>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работы выполнялись без внешнего финансирования.

Funding. The work was performed without external funding.

Статья поступила: 06.04.2022. **Принята к публикации:** 25.05.2022.

Article submitted: 06.04.2022. **Accepted for publication:** 25.05.2022.