

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ МЕДИКО-ХИРУРГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ИМЕНИ
Н.И. ПИРОГОВА» МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВРАЧЕЙ

**Предоперационная подготовка и
интраоперационное картирование в
лечении пациентов с опухолями
речевых зон**

Учебное пособие

Москва 2025

АВТОРЫ

Димерцев Алексей Владимирович – кандидат медицинских наук, ассистент, заведующий учебной частью кафедры нейрохирургии Института усовершенствования врачей ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России

Зуев Андрей Александрович – доктор медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой нейрохирургии Института усовершенствования врачей ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России

Педяш Никита Витальевич – ассистент кафедры нейрохирургии Института усовершенствования врачей ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России

Алексеев Иван Максимович – ассистент кафедры нейрохирургии Института усовершенствования врачей ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России

Учебное пособие включает современные представления о развитии, методах клинической диагностики и особенностях хирургического лечения пациентов с опухолями речевых зон

Рекомендовано учебно-методическим советом ИУВ ФГБУ «НМХЦ им. Н.И. Пирогова» Минздрава России в качестве учебного пособия для клинических ординаторов и слушателей системы послевузовского образования.

Протокол № 2 от 11 сентября 2025 года

Оглавление

Введение.....	4
Методы исследования речевой функции.....	6
МР-трактография (DTI-трактография).....	6
Интраоперационное картирование.....	8
Анатомо-функциональные особенности языков трактов белого вещества....	12
Вентральный поток.....	12
Верхний продольный пучок (SLF).....	12
Дугообразный пучок (AF).....	12
Дорзальный поток.....	13
Нижний лобно-затылочный пучок (IFOF).....	14
Нижний продольный пучок (ILF).....	15
Крючковидный пучок (UF).....	16
Лобный косой пучок (FAT).....	17
Литература.....	19

Введение

Первые представления об организации речевой функции головного мозга возникли в эру локационизма. Пионерами в вопросах локализации речевой функции головного мозга считаются французский антрополог Paul Broca и немецкий психоневропатолог Carl Wernicke, которые во второй половине XIX века (Broca, 1865; Wernicke, 1874) обнаружили корковые центры речевого праксиса и гнозиса. Впоследствии Р. Брока изучил данный вопрос более фундаментально и выделил нижнюю лобную извилину как участок коры головного мозга, ответственный за производство речи. Вскоре после открытия зоны Брока, Carl Wernicke, описал когорту пациентов с повреждениями задней части верхней височной извилины, имевшими неврологические последствия в виде нарушений понимания речи, парафазий, но с сохранной 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 две зоны, приведет к возникновению “проводниковой афазии”. Позже Norman Geschwind подтвердил это предположение, описав серию пациентов с повреждением дугообразного пучка, имевших нарушение повторения, но с сохранной способностью к пониманию и производству речи. Так родилось классическое представление о речевой функции головного мозга. Оно 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 как при поражении других областей коры, так и подкорковых структур головного мозга.

Современная парадигма речевой организации представляет собой модель из двух информационных потоков, каждый из которых вовлечен в определенный аспект речевого производства высшей нервной деятельности. Выделяют вентральный и дорзальный потоки, которые представляют из себя группу 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 является прослушивание смысловой речи. Дорзальный поток транслирует акустическую речевую информацию в корковые регионы, отвечающие за моторное воспроизводство, артикуляцию, таким образом, выполняя сенсомоторную речевую интеграцию. Тест на повторение речи служит для выявления поражения в дорзальном пучке.

Несмотря на множество исследований в области изучения речевой функции, остается открытым вопрос о латерализованности тех или иных аспектов речи; так, модель Нискок-Роерпел предполагает латерализованность дорзального потока в доминантном по речи полушарии и двустороннее представительство вентрального потока. Исследования с функциональной нейровизуализацией подтвердили активацию задних отделов верхней височной извилины с обеих сторон при прослушивании речи. Ряд исследований показал исключительную роль недоминантного полушария в восприятии эмоционального тона речи.

Вышеописанные особенности истории изучения речевой функции головного мозга иллюстрирует сложность морфо-функциональной 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 используют

селективный подход, изучая специфику работы конкретных трактов. В хирургии глиом зоны Брока существует ряд нерешенных вопросов: как подобрать оптимальное интраоперационное тестирование пациента, какой тип картирования коры предпочтительнее, а также используемые параметры стимуляции. Традиционно для выявления ошибок речи во время кортикального картирования используют тесты с называнием объектов и последовательный счет. Однако исследователи показали, что более релевантным тестированием является называние действий. Две принципиально разные техники используют так называемое «положительное картирование» - при котором производится стимуляция и маркирование всей коры мозга в хирургическом доступе, а также «негативное» - при котором нейрохирург изучает функцию только того региона, в области которого планируется проведение энцефалотомии. Непосредственно параметры стимуляции чаще используют традиционные низко- и высокочастотные (Penfield/Taniguchi). Сила и тип стимуляции до настоящего времени также активно обсуждаются, что создает неопределенность в выборе оптимальной техники. Как правило, опухоли Брока распространяются, в том числе и в моторный регион, в то же время, анализ хирургических исходов проводится отдельно для этих групп больных, что в свою очередь затрудняет создание единого алгоритма интраоперационного нейрофизиологического картирования.

Методы исследования речевой функции

МР-трактография (DTI-трактография)

Следующим шагом стало изучение структуры ассоциативных трактов белого вещества, играющего важную роль в отпавлении речевой функции. Важный вклад в изучении данного вопроса внес швейцарский анатом Josef Klingler, который в 1935 году открыл способ холодной фиксации препаратов головного мозга в формалине на 4-8 недель. Это позволило отделить волокна друг от друга и от серого вещества, что не представляется возможным на

нативном препарате. Появление магнитно-резонансной томографии (далее МР-трактография) и диффузионно-тензорной визуализации (diffusion tensor imaging, далее 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 (рисунок 1). Эффект DTI основан на анизотропии диффузии молекул воды по аксонам нейронов, что позволяет строить тракты белого вещества. Фракционная анизотропия - наиболее востребованный DTI-индекс, отражающий взаимоположение микроструктур между собой, направленность и плотность трактов белого вещества, диаметр и миелинизацию аксонов. Были построены и подробнее изучены дугообразный пучок (arcuate fasciculus, далее AF), верхний продольный пучок (superior longitudinal fasciculus, далее SLF), нижний лобно-затылочный пучок (inferior fronto-occipital fasciculus, далее IFOF), нижний продольный пучок (inferior longitudinal fasciculus, далее ILF), крючковидный пучок (uncinate fasciculus, далее UF), открыты лобный косо́й пучок (frontal aslant tract, далее FAT) и средний продольный пучок (middle longitudinal fasciculus, далее MLF). Однако, DTI имеет свои ограничения, поскольку построить тракт, компримируемый опухолью или плохо функционирующий, вызывает определенные трудности. Исследования, сравнивающие данные предоперационной подготовки с DTI-реконструкцией трактов и прямой интраоперационной электростимуляцией, показывают переменные данные; в ряде случаев совпадение стимуляции с DTI данными наблюдалось в 80% случаев. Другие данные указывают на специфическую высокую чувствительность к определенным трактам – так, совпадения с SLF было в 98% случаев, а для IFOF это были более низкие результаты – 89%. Кроме того, использование DTI-трактографии в нейронавигации может иметь свои погрешности, в том числе ввиду смещения структур головного мозга во время операции.

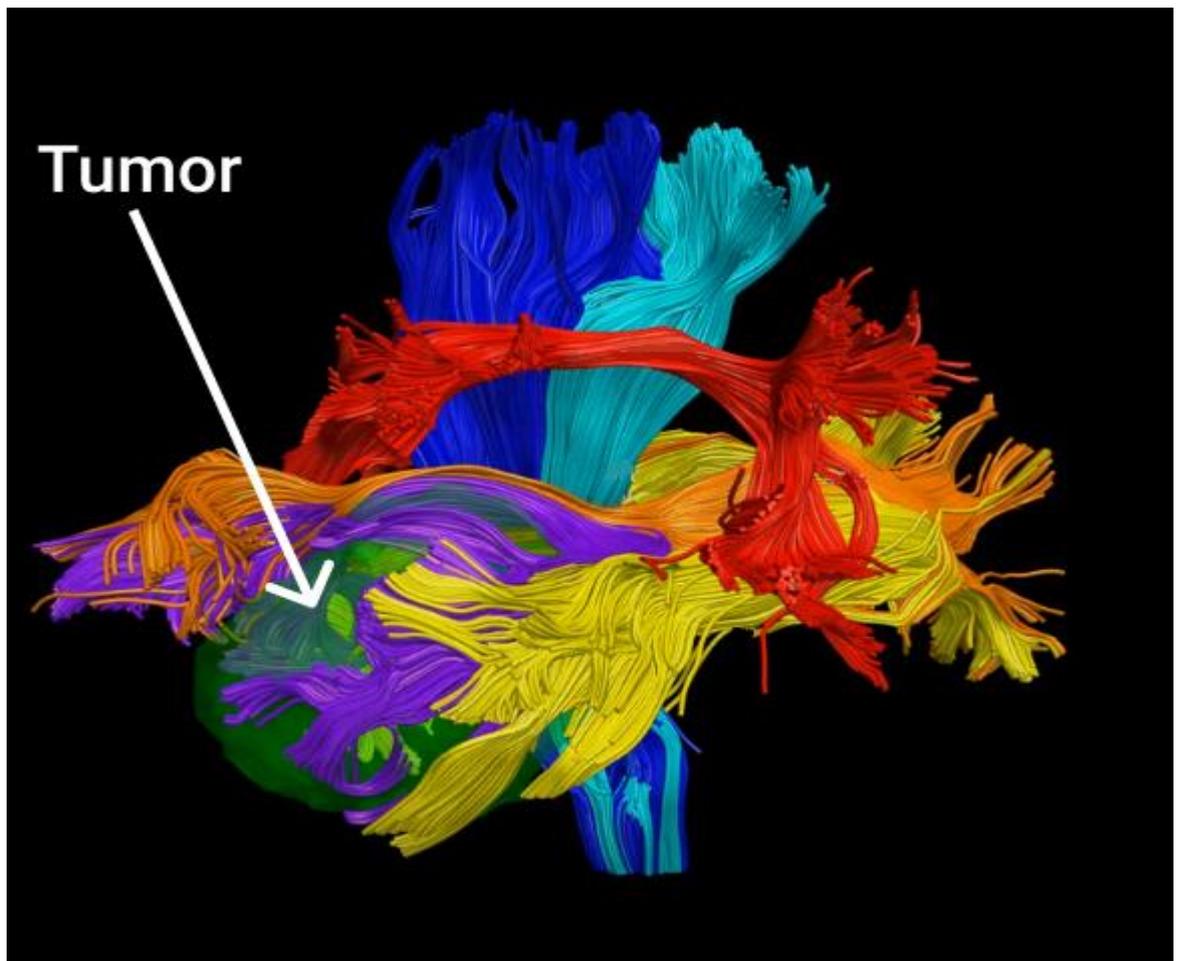


Рисунок 1. Трехмерная пространственная реконструкция взаиморасположения опухоли и проводящих путей белого вещества головного мозга.

Стрелкой указано положение опухоли, компримирующей проводящие пути головного мозга. Синим и голубым цветами выделен пирамидный тракт. Красным цветом дугообразный пучок (AF), желтым - нижний продольный пучок (ILF), оранжевым - нижний лобно-затылочный пучок (IFOF), фиолетовым - U-волокна (пути, соединяющие корковые нейроны соседних извилин).

Интраоперационное картирование

Внедрение интраоперационного картирования канадским нейрохирургом Wilder Penfield в 1937 году открыло новую эпоху в области хирургии эпилепсии и опухолей, локализованных в функционально значимых зонах коры головного мозга. Прямая электрическая стимуляция коры является уникальным способом изучения особенностей коркового

представительства речи в каждом конкретном случае. Электрическое картирование обычно производилось параллельно с предъявлением пациенту задач на счет, письмо, называние предметов, чтение. При положительном ответе зона мозга маркировалась наложением стерильной пронумерованной бумажки (рисунок 2). Разработанная Penfield в первой половине XX века техника краниотомии с пробуждением в значительной степени сохранила свой изначальный вид с минимальными дополнениями спустя более чем 70 лет. Penfield описал разные виды речевого нарушения, обнаруженные им при стимуляции перисильвиевого региона в левом полушарии, такие как: тотальная остановка речи, повторения, спутанность и тд. 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.

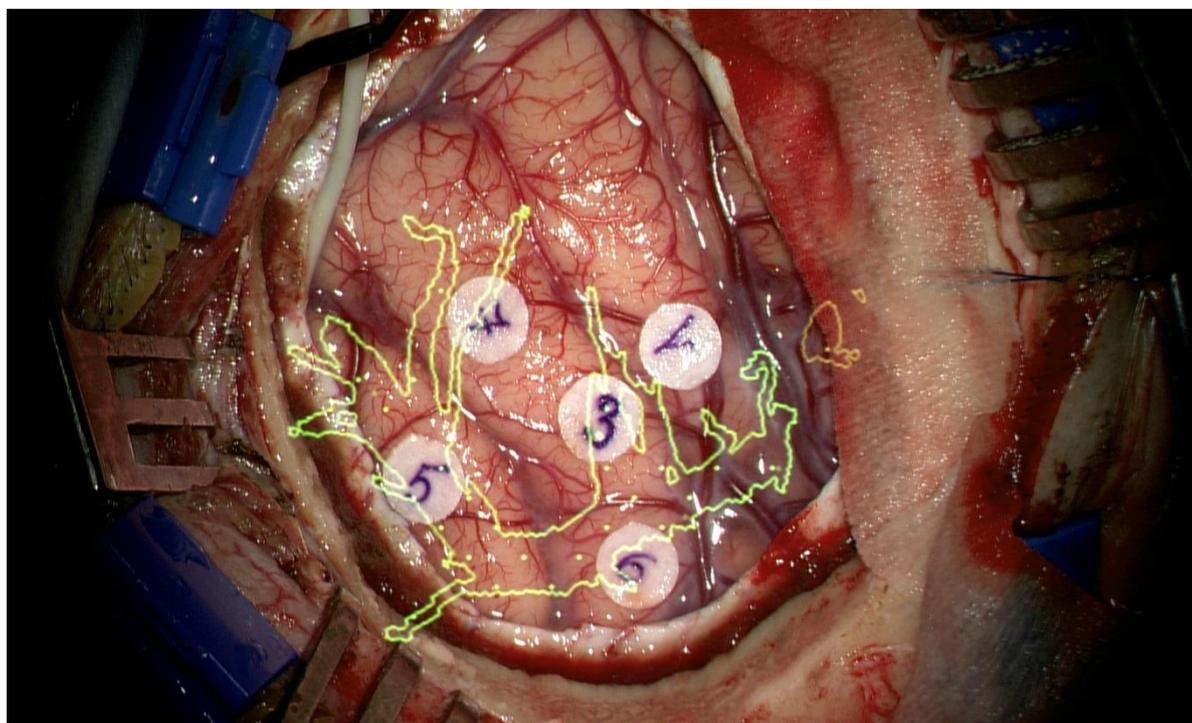


Рисунок 2. Операция с пробуждением и интраоперационным картированием речевых зон лобной доли головного мозга в режиме дополненной реальности

(интеграция данных предоперационной МР-трактографии с нейронавигацией и микроскопом). Положительные участки тестирования (ошибки, остановка речи, парафазии и т.д) при электрической стимуляции коры головного мозга обозначены пронумерованными бумажками. Желтым цветом выделена проекция дугообразного пучка (AF) на кору головного мозга (режим дополненной реальности).

Интраоперационное картирование функционально значимых зон стало широко популярно в нейрохирургии, и множество исследований на базе данной техники отражают 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 операции с пробуждением, стимуляция коры и картирование являются крайне важными и обязательными процедурами для качественной и безопасной работы в пределах языковых зон. Медленно растущие опухоли с инфильтрирующими свойствами, такие, как глиомы низкой степени злокачественности, могут вызывать реорганизацию коры, перераспределение функционально значимых зон, которые могут располагаться в пределах опухоли, в окружающей паренхиме или даже в противоположном полушарии. По данным литературы операции с картированием функционально значимых зон уменьшают выраженность послеоперационного неврологического дефицита, позволяя выполнять тотальное удаление опухолей.

Стимуляция помогает определить четкие функциональные границы приблизительно в пределах 1 см², за пределами которых обычно ответа на раздражение нет. Предоперационные методы картирования не дают такой точной информации, например, сравнение данных фМРТ и стимуляции коры на одни и те же раздражители показали более размытые и широкие границы функциональных зон на фМРТ по сравнению со стимуляцией коры этих пациентов. Благодаря стимуляции представляется возможным определить участки коры, выполняющие определяющую роль, а фМРТ дает информацию

о прилежащих зонах, 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 найденным при фМРТ. По данным литературы, резекция, выполненная на расстоянии 1 см от позитивных при стимуляции зон, не вызывала постоянного речевого дефицита в отличие от техники без учета данных регионов. При сравнении результатов фМРТ и прямой электростимуляции коры были получены переменные выводы о предсказательной силе фМРТ, данные совпадали в диапазоне от 29 до 52% случаев. 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 по смыслу с целевым) возникают при стимуляции задних отделов средней височной извилины, надкраевой извилины и нижней лобной извилины. Фонологические парафазии (замена звука в слове), неологизмы (несуществующие слова) и циркумлокации (описательный поиск слова) могут возникать при раздражении в области верхней височной борозды. Визуальные парафазии (существующее слово, обозначающее предмет, зрительно схожий с предъявляемым изображением) возникают при стимуляции базальных отделов затылочно-височной коры. При картировании верхней височной извилины можно получить полную остановку речи, что определяет ее значительную роль в финальной речевой интеграции до генерации моторных импульсов в лобной доле. Однако феномен полной остановки речи или анартрия может быть получен и при раздражении прецентральной извилины, лобной покрышечной части, височно-теменного сочленения. Penfield даже описал участки коры головного мозга в правой гемисфере, вызывающие анартрию при прямой электростимуляции, однако только в области лобной покрышки. Было обнаружено, что роль задней нижней и центральной средней височных

извилины заключается в назывании изображений. Чтение может быть прервано в средней височной извилине и нижней теменной доле. Картирование коры билингвов свидетельствует о существовании как общих, так и различных представительств коры для двух языков. Поэтому таким пациентам требуется картировать все участки коры, отвечающие за экспрессию обоих языков.

Анатомо-функциональные особенности языков трактов белого вещества

Вентральный поток

Верхний продольный пучок (SLF)

Трактами белого вещества в структуре дорзального потока являются SLF и AF. SLF включает в себя три сегмента: дорсальный сегмент, соединяющий угловую извилину со средней и верхней лобными извилинами; вентральный сегмент, начинающийся от надкраевой извилины и заканчивающийся в средней и нижней лобных извилинах; задний сегмент SLF, соединяющий зоны верхней и нижней теменных долек с задними отделами верхней и средней височных извилин. В функциональном отношении SLF отвечает за визуально-пространственное внимание (дорсальный сегмент); артикуляцию, восприятие речи, двигательное планирование (вентральный сегмент); поиск соответствующей лексической единицы, фонологическое формирование слова (задний сегмент). Прямая электрическая стимуляция SLF приводит к ошибкам повторения, нарушениям артикуляции. Спектр неврологических нарушений при нарушении целостности волокон SLF широк и включает в себя оптическую атаксию, явления апраксии, аграфию, мнестические нарушения, аномию, алексию, синдром неглекта или левостороннее пространственное игнорирование.

Дугообразный пучок (AF)

АФ - самый массивный речевой тракт, соединяющий слуховую область коры с задними отделами нижней и средней лобных извилин. Анатомически дугообразный пучок подразделяется на длинный и задний сегменты (рисунок 3). АФ играет важную роль в обработке речевой информации, его также называют фонологическим потоком. Ряд авторов относят к функциям АФ вербальную рабочую память и вербальную беглость. При прямой интраоперационной электростимуляции АФ возникают фонологические парафазии. Недоминантный АФ играет немаловажную роль в процессах социальной познавательной деятельности: интерпретации мимики, выражений лица, взгляда и других невербальных способах коммуникации. Кроме того, правый АФ участвует в процессах удерживания внимания, включая сложные задачи визуального поиска, таких как идентификация и акцентирование внимания, игнорирование помех. Интересно, что аномалии развития правого АФ приводят к явлениям амузии.

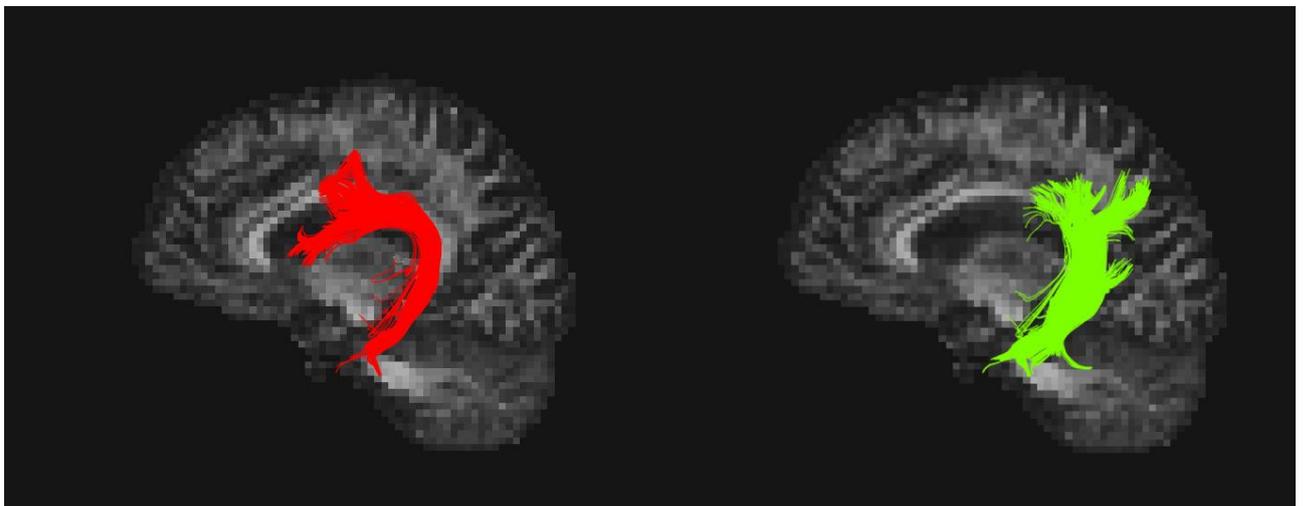


Рисунок 3. МР-трактография. Визуализация дугообразного пучка (АФ). Красным цветом выделен длинный сегмент дугообразного пучка, зеленым – задний сегмент.

Дорзальный поток

Синтаксическая и семантическая обработка речи является частью вентрального пути, который включает в себя IFOF, ILF, и UF.

Нижний лобно-затылочный пучок (IFOF)

IFOF – является крупным ассоциативным пучком белых волокон, простирающимся от нижней и средней лобных извилин к задней части теменной и затылочной долей головного мозга (рисунок 4). IFOF имеет три сегмента: вертикальный (IFOF-1), локализованный в лобной доле, и два горизонтальных сегмента, один из которых также располагается в лобной доле (IFOF-2), а последний – начинается от порога островка, проникает в височную долю, проходит через теменную долю и заканчивается непосредственно в затылочной доле (IFOF-3). Научная парадигма отводит первостепенную функциональную роль нижнего лобно-затылочного пучка семантическому процессингу, однако ряд авторов считают функциональный потенциал данного тракта более комплексным. Так, Conner et al. полагают что IFOF соединяет нейронные сети значимости биологического поведения с центрами его реализации, играя немаловажную роль в мотивации и цель-ориентированном поведении, внимании и даже в аффективном поведении. Другие исследования указывают на высокую частоту мнестических нарушений после удаления глиом островка, по-видимому, связанных с деструкцией волокон IFOF, указывая на недооцененную роль данного тракта в нейробиологии памяти. Исследования прямой интраоперационной электростимуляции IFOF на глубине верхней височной извилины указывают на высокую частоту семантических парафазий.

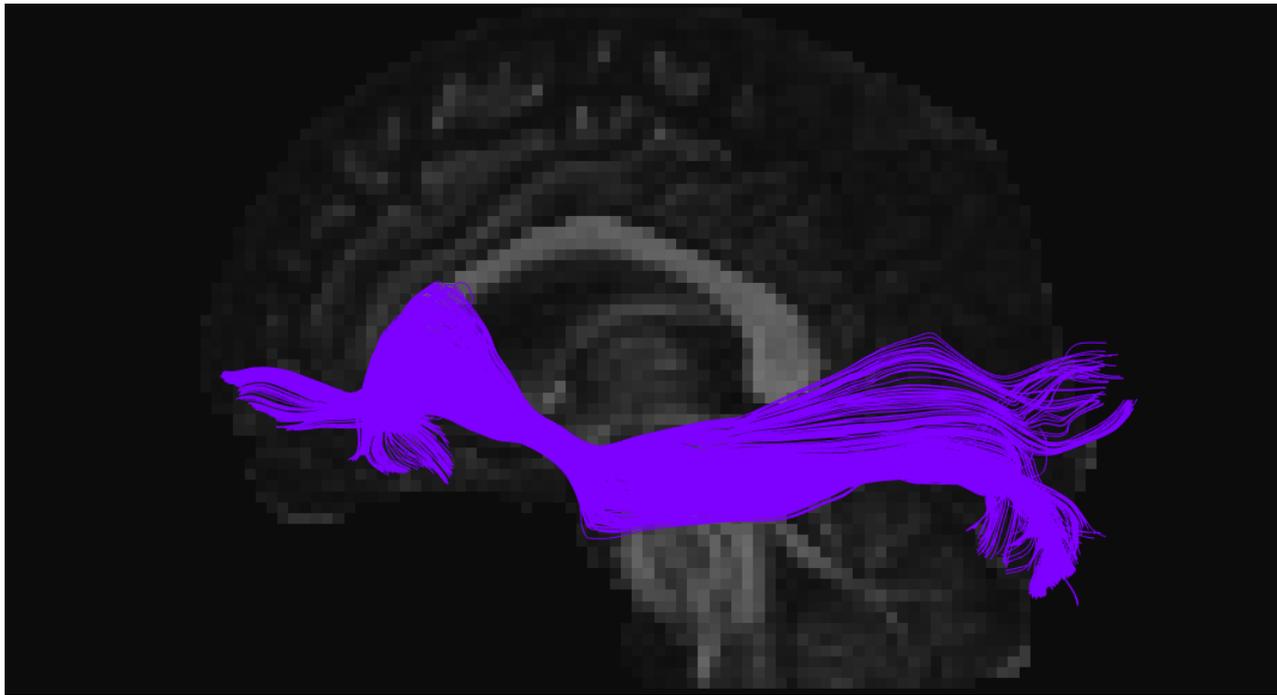


Рисунок 4. МР-трактография. Визуализация нижнего лобно-затылочного пучка (IFOF).

Нижний продольный пучок (ILF)

ILF - тракт белого вещества, соединяющий затылочно-височный регион с передними отделами височной доли головного мозга, располагается ниже IFOF. Анатомически ILF известен еще с первой половины XIX столетия (Reil, 1812; 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, что вызывало транзиторную зрительную геми-агнозию. Имеются сведения касательно роли ILF в семантической обработке речевой информации и лексическом поиске. Так, при DTI исследованиях у пациентов с обеднением волокон левого ILF были обнаружены нарушения в лексико-семантическом аспекте речеобразования. Изучение речевой функции у пациентов с рассеянным склерозом с очагом в структуре ILF подтверждают эти данные.

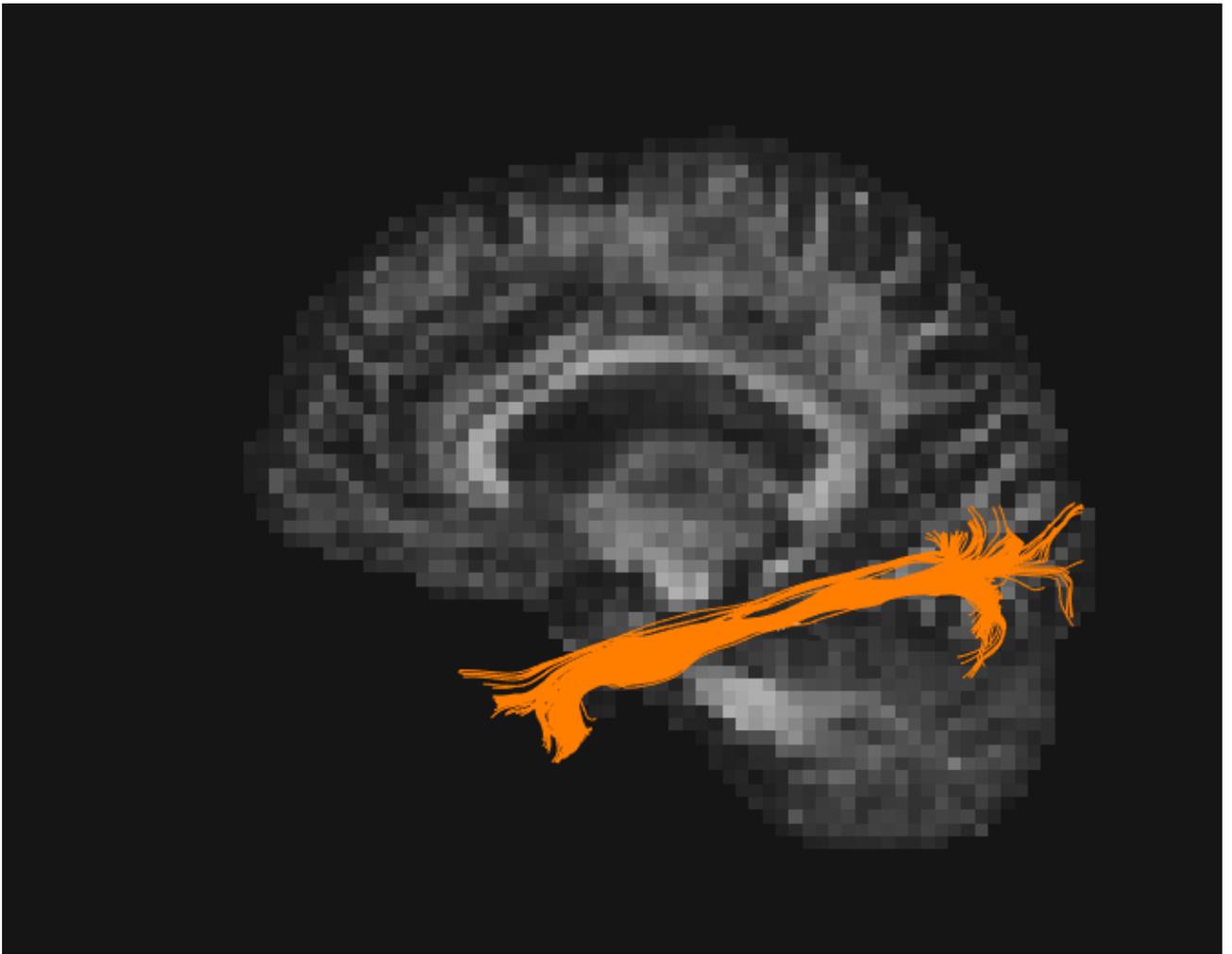


Рисунок 5. МР-трактография. Визуализация нижнего продольного пучка (ILF).

Крючковидный пучок (UF)

Роль UF относительно отправления языковой функции остается дискуссионной. Анатомический UF соединяет полюс височной доли с нижней лобной извилиной (рисунок 6), функционально предполагается его вклад в семантическую организацию языка. В одном исследовании при повреждении UF у пациентов возникали трудности называния имен знаменитых людей, в другом исследовании подобных нарушений не наблюдалось.

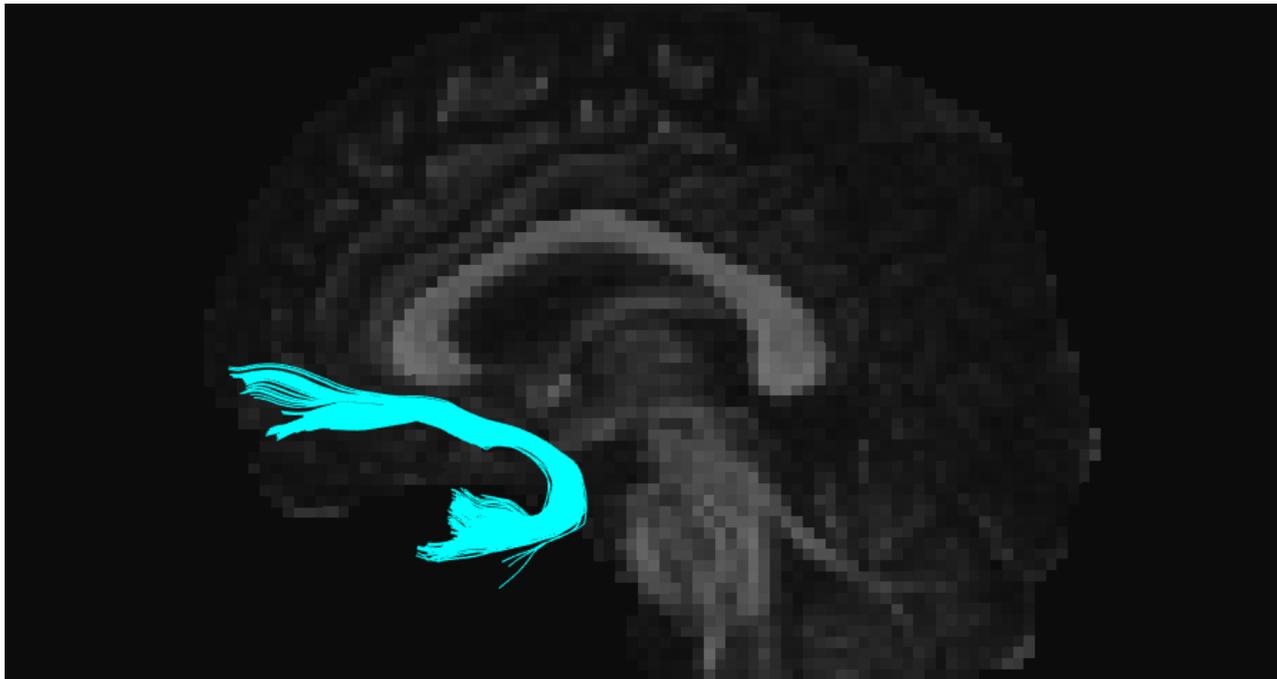


Рисунок 6. МР-трактография. Визуализация крючковидного пучка (UF).

Лобный косой пучок (FAT)

FAT – тракт соединяющий нижнюю лобную извилину с регионом дополнительной моторной коры. FAT играет определяющую роль в инициации речи. Первое упоминание о данном пучке датируются 2007 годом, Aron A. et al. описали пучок белого вещества соединяющий нижнюю лобную извилину и дополнительную моторную кору, однако не дали ему никакого названия. 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 и остановку речи. В исследовании по сравнению послеоперационных проявлений повреждения FAT и лобно-полосатого пучка были выявлены транзиторные нарушения инициации речи для FAT и аналогичные отклонения касательно движений тела для лобно-полосатого пучка. Нарушение целостности FAT приводит к таким последствиям, как снижение либо отсутствие спонтанной речи,

семантические и фонетические девиации, затруднения поиска глаголов. В исследованиях с поражением дополнительной моторной коры и нижней лобной извилины наблюдались речевые нарушения, подобные тем, которые возникают при повреждении FAT, что подтверждает их анатомо-функциональную связь.

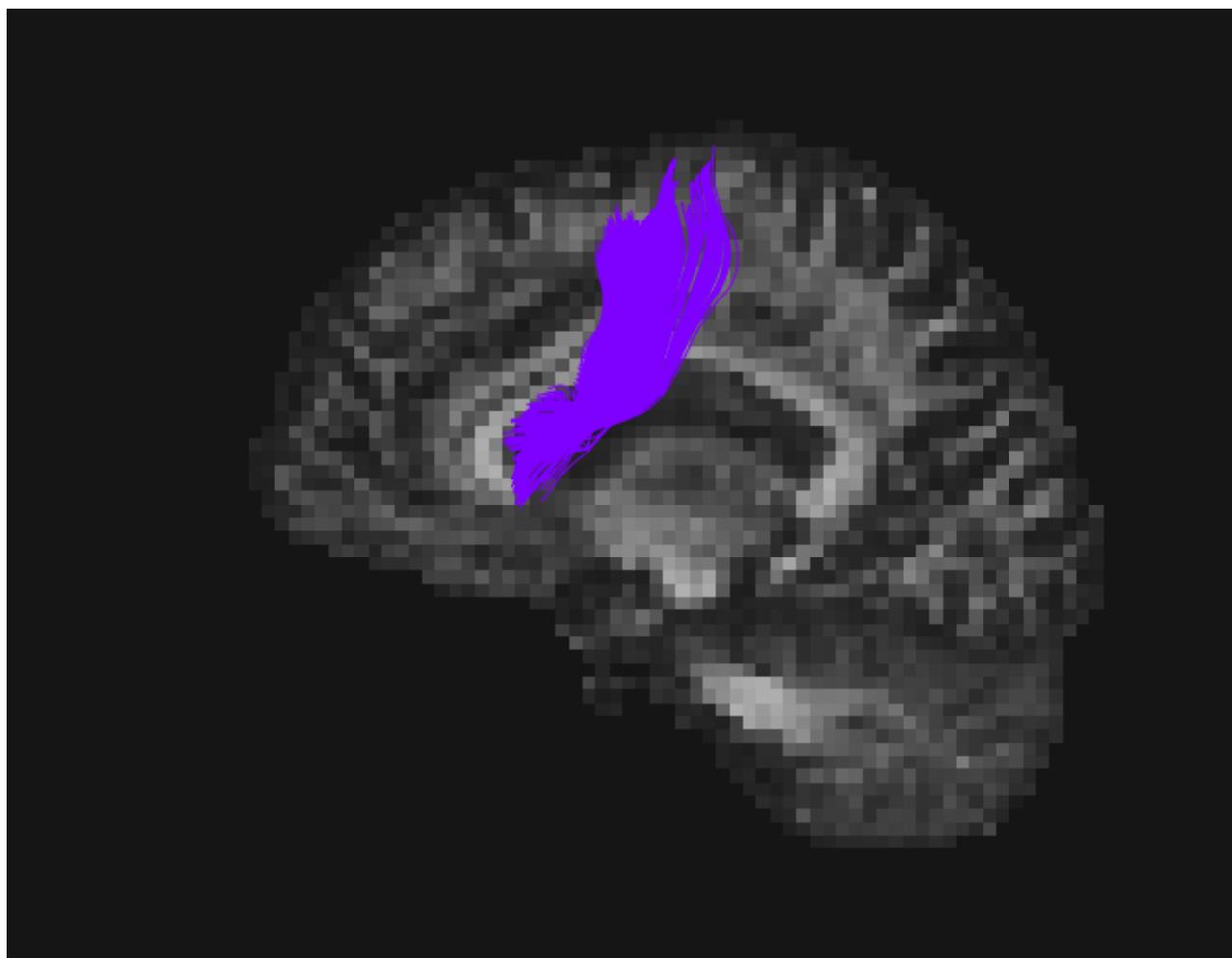


Рисунок 7. МР-трактография. Визуализация лобного косого пучка (FAT).

Литература

1. Geschwind N: Disconnexion syndromes in animals and man. I. **Brain** **88**:237–294, 1965
2. Tanabe H, Sawada T, Inoue N, Ogawa M, Kuriyama Y, Shiraishi J: Conduction aphasia and arcuate fasciculus. **Acta Neurol Scand** **76**:422–427, 1987
3. Mohr JP, Pessin MS, Finkelstein S, Funkenstein HH, Duncan GW, Davis KR: Broca aphasia: pathologic and clinical. **Neurology** **28**:311–324, 1978
4. Hickok G, Erhard P, Kassubek J, Helms-Tillery AK, Naeve-Velguth S, Strupp JP, et al: 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** **287**:156–160, 2000
5. Rauschecker JP, Scott SK: Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. **Nat Neurosci** **12**:718–724, 2009
6. Hickok G, Poeppel D: Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. **Cognition** **92**:67–99, 2004
7. Damasio AR: Aphasia. **N Engl J Med** **326**:531–539, 1992
8. Rauschecker JP, Scott SK: Maps and streams in the auditory cortex: nonhuman primates illuminate human speech processing. **Nat Neurosci** **12**:718–724, 2009
9. Buchanan TW, Lutz K, Mirzazade S, Specht K, Shah NJ, Zilles K, et al: Recognition of emotional prosody and verbal components of spoken language: an fMRI study. **Brain Res Cogn Brain Res** **9**:227–238, 2000
10. George MS, Parekh PI, Rosinsky N, Ketter TA, Kimbrell TA, Heilman KM, et al: Understanding emotional prosody activates right hemisphere regions. **Arch Neurol** **53**:665–670, 1996

11. Imaizumi S, Mori K, Kiritani S, Kawashima R, Sugiura M, Fukuda H, et al: Vocal identification of speaker and emotion activates different brain regions. **Neuroreport** **8**:2809–2812, 1997
12. Pell MD: Fundamental frequency encoding of linguistic and emotional prosody by right hemisphere-damaged speakers. **Brain Lang** **69**:161–192, 1999
13. Penfield W, Pasquet A: Combined regional and general anaesthesia for craniotomy and cortical exploration. Part I. Neurosurgical considerations. **Curr Res Anesth Analg** **33**:145–164, 1954
14. Penfield W, Roberts L: **Speech and Brain-Mechanisms**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1959, pp 103– 137
15. Lee YS, Lueders H, Dinner DS, Lesser RP, Hahn J, Klem G: Recording of auditory evoked potentials in man using chronic subdural electrodes. **Brain** **107**:115–131, 1984
16. Lesser RP, Lueders H, Dinner DS, Hahn J, Cohen L: The location of speech and writing functions in the frontal language area. Results of extraoperative cortical stimulation. **Brain** **107**:275–291, 1984
17. Duffau, H., Moritz-Gasser, S., & Mandonnet, E. (2014). A reexamination of neural basis of language processing: Proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming. *Brain and Language*, 131, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.05.011>
18. Benzagmout M, Gatignol P, Duffau H: Resection of World Health Organization Grade II gliomas involving Broca's area: methodological and functional considerations. *Neurosurgery* 61:741–753, 2007
19. Krainik A, Duffau H, Capelle L, Cornu P, Boch AL, Mangin JF, et al: Role of the healthy hemisphere in recovery after resection of the supplementary motor area. **Neurology** **62**:1323–1332, 2004

20. De Witt Hamer PC, Moritz-Gasser S, Gatignol P, Duffau H: Is the human left middle longitudinal fascicle essential for language? A brain electrostimulation study. **Hum Brain Mapp** **32**:962–973, 2011
21. 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** **28(2)**:E8, 2010
22. Haglund MM, Berger MS, Shamseldin M, Lettich E, Ojemann GA: Cortical localization of temporal lobe language sites in patients with gliomas. **Neurosurgery** **34**:567–576, 1994
23. Roux FE, Boulanouar K, Lotterie JA, Mejdoubi M, LeSage JP, Berry I: Language functional magnetic resonance imaging in preoperative assessment of language areas: correlation with direct cortical stimulation. **Neurosurgery** **52**:1335–1347, 2003
24. Rutten GJ, Ramsey NF, van Rijen PC, Noordmans HJ, van Veelen CW: Development of a functional magnetic resonance imaging protocol for intraoperative localization of critical temporoparietal language areas. **Ann Neurol** **51**:350–360, 2002
25. Spena G, Nava A, Cassini F, Pepoli A, Bruno M, D'Agata F, et al: 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)** **152**:1835–1846, 2010
26. Bello L, Gallucci M, Fava M, Carrabba G, Giussani C, Acerbi F, et al: Intraoperative subcortical language tract mapping guides surgical removal of gliomas involving speech areas. **Neurosurgery** **60**:67–82, 2007
27. Corina DP, Loudermilk BC, Detwiler L, Martin RF, Brinkley JF, Ojemann G: Analysis of naming errors during cortical stimulation mapping: implications for models of language representation. **Brain Lang** **115**:101–112, 2010

28. Mandonnet E, Gatignol P, Duffau H: Evidence for an occipito-temporal tract underlying visual recognition in picture naming. **Clin Neurol Neurosurg** **111**:601–605, 2009
29. Schwartz TH, Devinsky O, Doyle W, Perrine K: Function-specific high-probability “nodes” identified in posterior language cortex. **Epilepsia** **40**:575–583, 1999
30. Lucas TH II, McKhann GM II, Ojemann GA: 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** **101**:449–457, 2004
31. Agrawal A, Kapfhammer JP, Kress A, Wichers H, Deep A, Feindel W, Sonntag VKH, Spetzler RF, Preul MC. Josef Klingler’s Models of White Matter Tracts: Influences on Neuroanatomy, Neurosurgery, and Neuroimaging. *Neurosurgery*. 2011;69(2):238-254. doi: 10.1227/NEU.0b013e318214ab79
32. Axer H, Klingner CM, 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
33. Moseley ME, Cohen Y, Kucharczyk J, Mintorovitch J, Asgari HS, Wendland MF, Tsuruda J, Norman D. Diffusion-weighted MR imaging of anisotropic water diffusion in cat central nervous system. *Radiology*. 1990;176(2):439-445.
34. Kochunov P, Thompson PM, Lancaster JL, Bartzokis G, Smith S, Coyle T et al (2007) Relationship between white matter fractional anisotropy and other indices of cerebral health in normal aging: tract-based spatial statistics study of aging. *Neuroimage* 35:478–487
35. De Benedictis A, Duffau H, Paradiso B, Grandi E, Balbi S, Granieri E, Colarusso E, Chioffi F, Marras CE, Sarubbo S. Anatomic-functional study of the temporo-parieto-occipital region: dissection, tractographic and brain

- mapping evidence from a neurosurgical perspective. *J Anat.* 2014;225(2):132-151. doi: 10.1111/joa.12204
36. Leclercq D, Duffau H, Delmaire C, Capelle L, Gatignol P, Ducros M, et al: Comparison of diffusion tensor imaging tractography of language tracts and intraoperative subcortical stimulations. Clinical article. **J Neurosurg** **112**:503–511, 2010
37. Meyer, L., Cunitz, K., Obleser, J., & Friederici, A. D. (2014). Sentence processing and verbal working memory in a white-matter- disconnection patient. *Neuropsychologia*, 61, 190–196. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.06.014>
38. Bello L, Gambini A, Castellano A, Carrabba G, Acerbi F, Fava E, et al: Motor and language DTI Fiber Tracking combined with intraoperative subcortical mapping for surgical removal of gliomas. **Neuroimage** **39**:369–382, 2008
39. Nimsky C, Ganslandt O, Hastreiter P, Wang R, Benner T, Sorensen AG, et al: Intraoperative diffusion-tensor MR imaging: shifting of white matter tracts during neurosurgical procedures—initial experience. **Radiology** **234**:218–225, 2005a
40. Shulman, G. L., Pope, D. L., Astafiev, S. V., McAvoy, M. P., Snyder, A. Z., & Corbetta, M. (2010). Right hemisphere dominance during spatial selective attention and target detection occurs outside the dorsal frontoparietal network. *The Journal of Neuroscience*, 30(10), 3640–3651. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4085-09.2010>
41. Karnath, H. O., & Perenin, M. T. (2005). Cortical control of visually guided reaching: Evidence from patients with optic ataxia. *Cerebral Cortex*, 15(10), 1561–1569. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi034>
42. Kellmeyer, P., Ziegler, W., Peschke, C., Juliane, E., Schnell, S., Baumgaertner, A., Weiller, C., & Saur, D. (2013). Fronto-parietal dorsal and ventral pathways in the context of different linguistic manipulations. *Brain*

- and Language, 127(2), 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.09.011>.
43. Goranskaya, D., Kreitewolf, J., Mueller, J. L., Friederici, A. D., & Hartwigsen, G. (2016). Fronto-parietal contributions to phonological processes in successful artificial grammar learning. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10, 551. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00551>.
44. Herbet, G., Moritz-Gasser, S., Boisseau, M., Duvaux, S., Cochereau, J., & Duffau, H. (2016). Converging evidence for a cortico-subcortical network mediating lexical retrieval. *Brain*, 139(11), 3007–3021. <https://doi.org/10.1093/brain/aww220>.
45. van Geemen, K., Herbet, G., Moritz-Gasser, S., & Duffau, H. (2014). Limited plastic potential of the left ventral premotor cortex in speech articulation: Evidence from intraoperative awake mapping in glioma patients. *Human Brain Mapping*, 35(4), 1587–1596. <https://doi.org/10.1002/hbm.22275>.
46. Maldonado, I. L., Moritz-Gasser, S., & Duffau, H. (2011b). Does the left superior longitudinal fascicle subserve language semantics? A brain electrostimulation study. *Brain Structure & Function*, 216(3), 263–274. <https://doi.org/10.1007/s00429-011-0309-x>.
47. Timpert, D. C., Weiss, P. H., Vossel, S., Dovern, A., & Fink, G. R. (2015). Apraxia and spatial inattention dissociate in left hemisphere stroke. *Cortex*, 71, 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.07.023>.
48. Kinoshita, M., Nakajima, R., Shinohara, H., Miyashita, K., Tanaka, S., Okita, H., Nakada, M., & Hayashi, Y. (2016b). 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. *Journal of Neurosurgery*, 125(4), 1024–1032. <https://doi.org/10.3171/2015.10.JNS1591>
49. Li, M., Zhang, Y., Song, L., Huang, R., Ding, J., Fang, Y., Xu, Y., & Han, Z. (2017). Structural connectivity subserving verbal fluency revealed by

- lesion-behavior mapping in stroke patients. *Neuropsychologia*, 101, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.05.008>
50. Sarubbo, S., De Benedictis, A., Merler, S., Mandonnet, E., Balbi, S., Granieri, E., et al. (2015). Towards a functional atlas of human white matter. *Human Brain Mapping*, 36(8), 3117–3136. <https://doi.org/10.1002/hbm.22832>.
51. Zemmoura, I., Herbet, G., Moritz-Gasser, S., & Duffau, H. (2015). New insights into the neural network mediating reading processes provided by cortico-subcortical electrical mapping. *Human Brain Mapping*, 36(6), 2215–2230. <https://doi.org/10.1002/hbm.22766>.
52. Toba, M. N., Migliaccio, R., Batrancourt, B., Bourlon, C., Duret, C., Pradat-Diehl, P., Dubois, B., & Bartolomeo, P. (2018). Common brain networks for distinct deficits in visual neglect. A combined structural and tractography MRI approach. *Neuropsychologia*, 115, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.10.018>.
53. Bartolomeo, P., Thiebaut de Schotten, M., & Doricchi, F. (2007). Left unilateral neglect as a disconnection syndrome. *Cerebral Cortex*, 17(11), 2479–2490. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl181>
54. Maldonado, I. L., Moritz-Gasser, S., de Champfleury, N. M., Bertram, L., Moulinie, G., & Duffau, H. (2011a). Surgery for gliomas involving the left inferior parietal lobule: New insights into the functional anatomy provided by stimulation mapping in awake patients. *Journal of Neurosurgery*, 115(4), 770–779. <https://doi.org/10.3171/2011.5.JNS112>
55. Herbet, G., Lafargue, G., Bonnetblanc, F., Moritz-Gasser, S., Menjot de Champfleury, N., & Duffau, H. (2014). Inferring a dual-stream model of mentalizing from associative white matter fibres disconnection. *Brain*, 137(Pt 3), 944–959. <https://doi.org/10.1093/brain/awt370>
56. Nakajima, R., Yordanova, Y. N., Duffau, H., & Herbet, G. (2018b). Neuropsychological evidence for the crucial role of the right arcuate fasciculus in the face-based mentalizing network: A disconnection analysis.

- Neuropsychologia, 115, 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.01.024>
57. Hattori, T., Ito, K., Nakazawa, C., Numasawa, Y., Watanabe, M., Aoki, S., Mizusawa, H., Ishiai, S., & Yokota, T. (2018). Structural connectivity in spatial attention network: Reconstruction from left hemispatial neglect. *Brain Imaging and Behavior*, 12(2), 309–323. <https://doi.org/10.1007/s11682-017-9698-7>.
58. Suchan, J., Umarova, R., Schnell, S., Himmelbach, M., Weiller, C., Karnath, H. O., & Saur, D. (2014). Fiber pathways connecting cortical areas relevant for spatial orienting and exploration. *Human Brain Mapping*, 35(3), 1031–1043. <https://doi.org/10.1002/hbm.22232>.
59. Chen, X., Zhao, Y., Zhong, S., Cui, Z., Li, J., Gong, G., Dong, Q., & Nan, Y. (2018). The lateralized arcuate fasciculus in developmental pitch disorders among mandarin amusics: Left for speech and right for music. *Brain Structure & Function*, 223(4), 2013–2024. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1608-2>
60. Conner AK, Briggs RG, Sali G, Rahimi M, Baker CM, Burks JD, et al. A connectomic atlas of the human cerebrum—chapter 13: tractographic description of the inferior fronto-occipital fasciculus. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 2018;15:S436–43.
61. Zhang J, Wei X, Xie S, Zhou Z, Shang D, Ji R, et al. Multifunctional roles of the ventral stream in language models: advanced segmental quantification in post-stroke aphasic patients. *Front Neurol* 2018;9:89.
62. Martino J, De Lucas EM. Subcortical anatomy of the lateral association fascicles of the brain: a review. *Clin Anat* 2014;27:563–9.
63. Gil-Robles S, Carvallo A, Jimenez Mdel M, Gomez Caicoya A, Martinez R, Ruiz-Ocaña C, Duffau H. Double dissociation between visual recognition and picture naming: a study of the visual language connectivity using tractography and brain stimulation. *Neurosurgery*. 2013 Apr; 72(4):678-86.

64. Mandelli ML, Caverzasi E, Binney RJ, Henry ML, Lobach I, Block N, Amirbekian B, Dronkers N, Miller BL, Henry RG, Gorno-Tempini ML. Frontal white matter tracts sustaining speech production in primary progressive aphasia. *J Neurosci*. 2014 Jul 16; 34(29):9754-67.
65. Agosta F, Henry RG, Migliaccio R, Neuhaus J, Miller BL, Dronkers NF, Brambati SM, Filippi M, Ogar JM, Wilson SM, Gorno-Tempini ML. Language networks in semantic dementia. *Brain*. 2010 Jan; 133(Pt 1):286-99.
66. Papagno C, Miracapillo C, Casarotti A, Romero Lauro LJ, Castellano A, Falini A, et al: What is the role of the uncinate fasciculus? Surgical removal and proper name retrieval. **Brain** 134:405–414, 2011
67. Duffau H, Gatignol P, Moritz-Gasser S, Mandonnet E: Is the left uncinate fasciculus essential for language? A cerebral stimulation study. **J Neurol** 256:382–389, 2009
68. Catani M, Dell'acqua F, Vergani F, Malik F, Hodge H, Roy P, et al: Short frontal lobe connections of the human brain. **Cortex** 48:273–291, 2012
69. Catani, M., Mesulam, M. M., Jakobsen, E., Malik, F., Martersteck, A., Wieneke, C., ... Rogalski, E. (2013). A novel frontal pathway underlies verbal fluency in primary progressive aphasia. *Brain: A Journal of Neurology*, 136(8), 2619–2628. <https://doi.org/10.1093/brain/awt163>
70. Thiebaut de Schotten, M., Dell'Acqua, F., Valabregue, R., & Catani, M. (2012). Monkey to human comparative anatomy of the frontal lobe association tracts. *Cortex*, 48(1), 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.10.001>
71. Aron, A. R., Behrens, T. E., Smith, S., Frank, M. J., & Poldrack, R. A. (2007). Triangulating a cognitive control network using diffusion-weighted magnetic resonance imaging (MRI) and functional MRI. *J Neurosci*, 27(14), 3743-3752. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0519-07.2007
72. Kemerdere, R., de Champfleury, N. M., Deverdun, J., Cochereau, J., Moritz-Gasser, S., Herbet, G., et al. (2016). Role of the left frontal aslant tract in

- stuttering: A brain stimulation and tractographic study. *Journal of Neurology*, 263, 157–167
73. Vassal, F., Boutet, C., Lemaire, J.-J., & Nuti, C. (2014). 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. *British Journal of Neurosurgery*, 28, 685–687.
74. Kinoshita, M., de Champfleury, N. M., Deverdun, J., Moritz-Gasser, S., Herbet, G., & Duffau, H. (2015). Role of fronto-striatal tract and frontal aslant tract in movement and speech: An axonal mapping study. *Brain Structure & Function*, 220(6), 3399–3412. <https://doi.org/10.1007/s00429-014-0863-0>
75. Fujii, M., Maesawa, S., Motomura, K., Futamura, M., Hayashi, Y., Koba, I., et al. (2015). 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. *Journal of Neurosurgery*, 122, 1390–1396.
76. Chernoff, B. L., Teghipco, A., Garcea, F. E., Sims, M. H., Paul, D. A., Tivarus, M. E., ... Mahon, B. Z. (2018). A Role for the Frontal Aslant Tract in Speech Planning: A Neurosurgical Case Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(5), 752–769. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01244
77. Andrey Zyryanov, Svetlana Malyutina, Olga Dragoy: Left frontal aslant tract and lexical selection: Evidence from frontal lobe lesions. *Neuropsychologia* (2020) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107385>