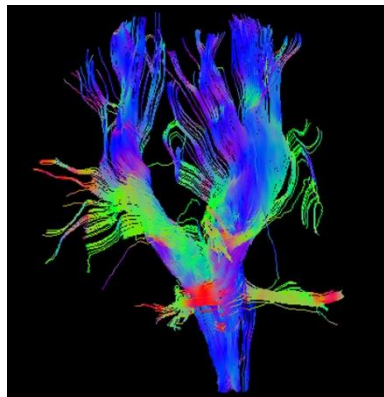
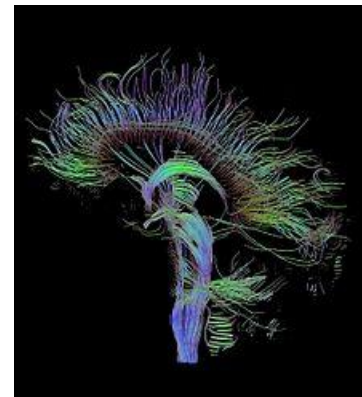


Диффузионная МРТ



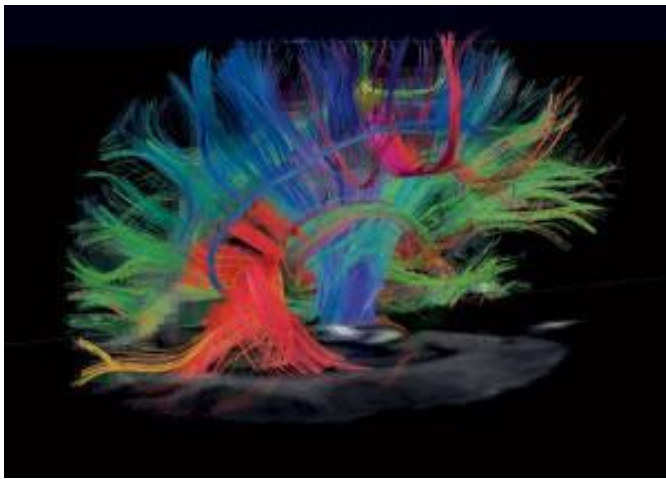
Диффузия — процесс движение ионов, происходящий в ходе метаболических реакций в клетке. Этот процесс изменяется при различных патологических изменениях.

Диффузионная спектральная томография – неинвазивная методика медицинской визуализации, применяемая в магнитно-резонансной томографии, для количественного измерения диффузии молекул воды в биологических тканях.

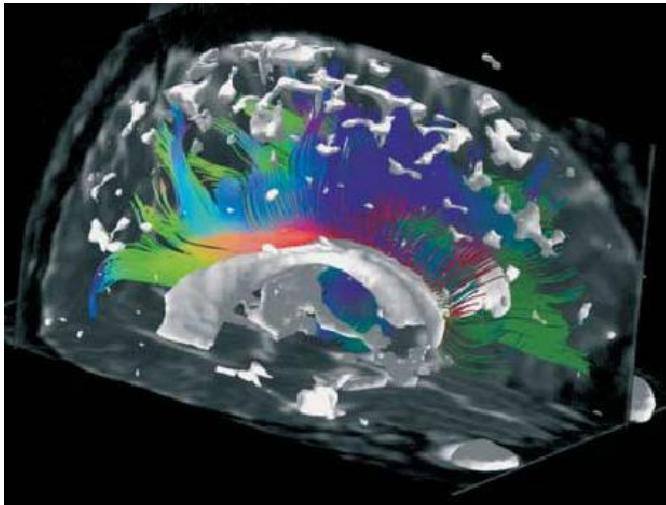


Диффузия в биологических тканях ограничена множеством препятствий, такими как стенки клеток и нейронные тракты, а характеристики диффузии в тканях изменяются при некоторых заболеваниях центральной нервной системы. Измерив тензор диффузии, можно рассчитать направление максимальной диффузии и тем самым получить информацию о геометрическом строении тканей человека, например, направлении крупных пучков нервных волокон. Как и классическая МРТ, диффузионно-взвешенная визуализация является неинвазивной процедурой: поскольку контраст изображения достигается исключительно при помощи градиента магнитного поля, то не требуется ни инъекции контрастного вещества, ни использования ионизирующего излучения.

Каждый пространственный элемент (воксел) определяется более чем одним числовым значением. По томограммам, в градациях серого цвета, вычисляется тензор (в частности, матрица размером 3×3), описывающий диффузию в трёхмерном изображении. Такие измерения занимают значительно больше времени, чем обычная МРТ, и генерируют большие объёмы данных, которые могут быть обработаны только рентгенологом с помощью различных методов визуализации.



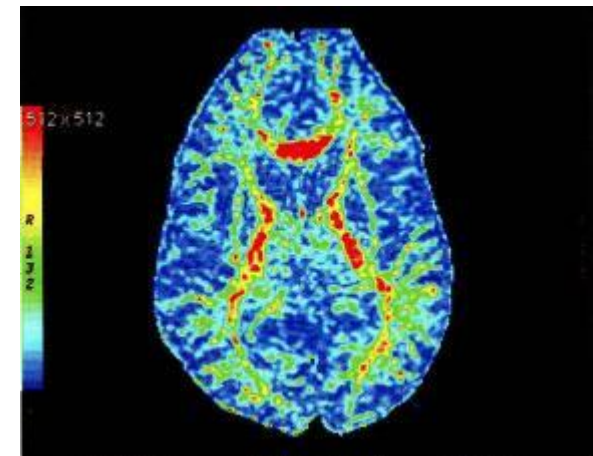
Диффузионная тензорная визуализация проводящих путей головного мозга.



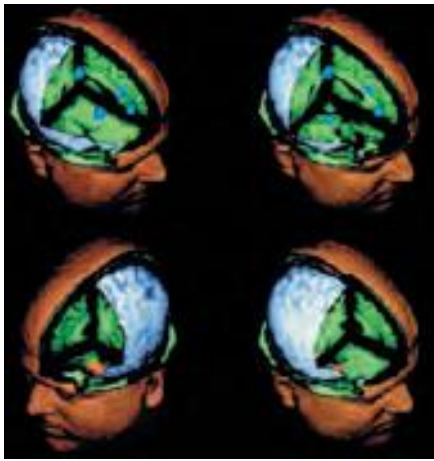
MP-трактография (исследование проводящих путей головного мозга)

В диффузионно-тензорной МРТ по ориентации эллипсоидов диффузии в вокселях определяют ход нервных волокон, образующих нервные тракты, соединяя друг с другом собственные векторы диффузионного тензора. Алгоритмы соединения довольно сложны, поэтому применяют различные методы расчёта, позволяющие "нарисовать" ход множества нервных волокон, образующих нервный тракт.

Вследствие этого тензорную МРТ часто называют трактографией – методом визуализации хода нервных трактов. В простейшей форме частичная анизотропия диффузии кодируется цветом, а визуализация направлений диффузионного движения молекул воды в тканях осуществляется окрашиванием определённым цветом пикселей в зависимости от ориентации их собственного вектора (красным - по оси X, зелёным - по оси Y, синим - по оси Z)



Цветовая карта анизотропии



Функциональная магнитно-резонансная томография (ФМРТ) позволяет дополнять схему принципиального строения мозга картиной участков наибольшей активности мозга. Для возбуждения нейронов нужны глюкоза и кислород, поступающие с кровью. Активация того или иного участка мозга сопровождается усилением притока этих веществ, и ФМРТ позволяет наблюдать те участки, куда кислорода поступает особенно много. Новейшие аппараты для ФМРТ позволяют сканировать мозг с частотой четыре раза в секунду. Чтобы отреагировать на внешний стимул, мозгу требуется примерно полсекунды, поэтому данный метод позволяет наблюдать всплески и затухания активности, возникающие в определенных частях мозга в ответ на стимулы или в процессе выполнения заданий. Метод ФМРТ оказался самым информативным из всех современных, но он необычайно дорогой.

Нервные клетки разных типов выделяют разные нейромедиаторы. Информация распространяется в мозге по проводящим путям — цепочкам нейронов, выделяющими вещества и с их помощью возбуждающими или подавляющими активность друг друга. Любой из нейромедиаторов довольно широко распространен в мозге, но работает лишь в определенных его участках и может оказывать разное действие в зависимости от того, где он выделяется. Нейромедиаторы бывают возбуждающими (способствуют возбуждению нейронов, на которые они действуют) и тормозными (подавляют активность нейронов).

Науке известны сотни нейромедиаторов, но самые важные из них следующие.

Серотонин — нейромедиатор, иногда называют «веществом хорошего настроения». Он и в самом деле оказывает существенное влияние на настроение: повышенная концентрация серотонина (или чувствительность к нему) сопряжена с оптимизмом и спокойствием. Кроме того, серотонин влияет на сон, чувствительность к боли, аппетит и давление крови.

Ацетилхолин управляет активностью в участках мозга, связанных с концентрацией внимания, обучением и памятью. У людей, страдающих болезнью Альцгеймера, его уровень в коре больших полушарий обычно понижен.

Норадреналин — преимущественно возбуждающий нейромедиатор, способствующий повышению уровня физической и умственной активности и оказывающий бодрящее действие. Основной центр выработки норадреналина находится в голубом пятне — одном из нескольких участков мозга, претендующих на то, чтобы в просторечии именоваться «центром удовольствия».

Глутамат — основной возбуждающий нейромедиатор головного мозга, обеспечивающий формирование связей между нейронами, работа которых лежит в основе обучения и долговременной памяти.

Энкефалины и эндорфины — эндогенные опиоиды, которые, подобно наркотикам, облегчают восприятие боли, снижают стресс и способствуют возникновению ощущения легкости и безмятежности. Кроме того, они подавляют некоторые физиологические процессы, такие как дыхание, и могут вызывать физиологическую зависимость.

Окситоцин помогает «размывать» границы «я», создавая ощущение единства с другими и тем самым формируя теплые и доверительные отношения между людьми, особенно между влюбленными и между матерью и младенцем. Он в огромных количествах выделяется у женщин при родах и у людей обоих полов во время оргазма.

Дофаминовые связи

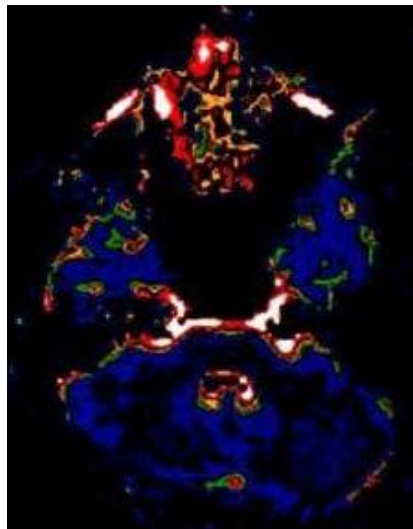
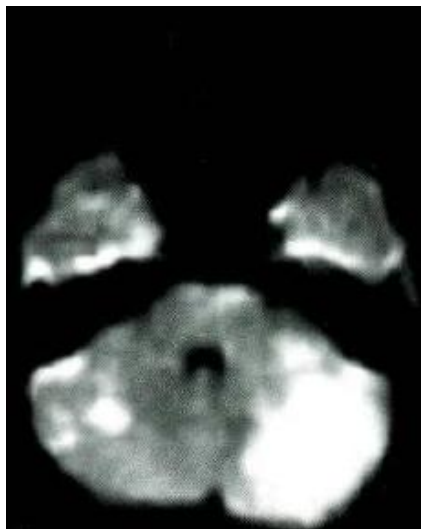
Дофамин является биохимическим предшественником норадреналина (и адреналина), является одним из химических факторов внутреннего подкрепления (ФВП) и служит важной частью «системы вознаграждения» мозга, поскольку вызывает чувство удовольствия (или удовлетворения), чем влияет на процессы мотивации и обучения. Нейробиологические эксперименты показали, что даже воспоминания о поощрении могут увеличить уровень дофамина, поэтому данный нейромедиатор используется мозгом для оценки и мотивации, закрепляя важные для выживания и продолжения рода действия. Он вызывает у нас желание, предвкушение и возбуждение.

Дофаминовые проводящие пути проходят, извиваясь, по всему головному мозгу, в разных местах выполняя разные функции.

В глубине ствола мозга, в структуре, называемой черной субстанцией, располагаются производящие дофамин нейроны, стимулирующие и поддерживающие нашу активность, физическую и умственную. Когда эти клетки дегенерируют, как при болезни Паркинсона, человек теряет способность уверенно шагать вперед — как в прямом, так и в переносном смысле.

Другой комплекс дофаминовых путей называют «системой вознаграждения» нашего мозга. Они ведут от вентральной области покрышки к миндалине, прилежащему ядру, септуму и префронтальной коре (все эти структуры вместе называют медиальным пучком переднего мозга). Стимуляция прилежащего ядра дофамином запускает приготовление нашего тела к тому, чтобы схватить желанный объект или пуститься за ним в погоню, в то время как миндалина определяет ценность этого объекта и способствует возникновению осознанного ощущения возбуждения, а префронтальная кора и септум концентрируют наше внимание на намеченной цели. Все вместе эти реакции создают у нас приподнятое настроение.

Диффузионно-тензорная МРТ позволяет обнаружить структурные связи между отделами мозга, что особенно важно при объёмных процессах и заболеваниях, искажающих анатомическую структуру или разрушающих белое вещество (опухоли, ЧМТ, демиелинизирующие заболевания и др.). Снижение скорости измеряемого коэффициента диффузии в тканях мозга – чувствительный индикатор ишемических нарушений и степени тяжести ишемии. В острой фазе мозгового инсульта на диффузионно-взвешенных изображениях зона поражения мозга имеет типично высокий МР-сигнал, тогда как нормальные ткани мозга выглядят тёмными. На картах измеряемого коэффициента диффузии – обратная картина. Карты измеряемого коэффициента диффузии стали средством диагностики ишемии и динамического наблюдения за развитием острого нарушения мозгового кровообращения и последующей хронической дегенерации тканей, вызванной ишемией. Неинвазивность и быстрота применения диффузионно-взвешенных изображений определяют главенствующее значение метода в первичной диагностике ишемического поражения мозга.



Острейшая фаза (3 ч) мозгового инсульта в вертебробазиллярной системе:

1. На диффузионно-взвешенном изображении нормальные ткани мозга выглядят тёмными, зоны поражения в обеих гемисферах мозжечка (D>S) имеют типично высокий МР-сигнал;
2. на диффузионной цветовой карте - обратная картина;
3. на мр-томограмме в режиме T2 зона поражения ещё не видна.

В основе диффузионных МР-исследований лежит эхо-планарная импульсная последовательность (ИП DW-EPI). Она позволяет регистрировать данные, необходимые для построения изображения одного среза головного мозга, за 0,1 с, а получение временной серии срезов (до 500 последовательных изображений) занимает 2–3 мин.

DW-EPI отличается от эхо-планарной импульсной последовательности «спиновое эхо» (SE EPI) наличием добавочной пары диффузионных градиентов (ДГ), которые позволяют оценить микроскопические изменения фазы МР- сигнала, возникающие за счет хаотического теплового движения протонов вместе с молекулами воды. Связанные с диффузионным движением изменения фазы приводят к снижению МР-сигнала. Получаемые с помощью ИП DW-EPI изображения называют диффузионно-взвешенными (ДВИ), хотя в действительности интенсивность МР-сигнала на ДВИ зависит одновременно и от T_2 скорости релаксации, и от скорости диффузии в тканях мозга. Степень взвешенности по скорости диффузии задается значением параметра протокола импульсной последовательности – b , получившего название «фактор диффузии», величина которого зависит от длительности ДГ и времени задержки между ними:

$$b = \gamma^2 G^2 \delta^2 (\Delta - \delta/3),$$

где γ – гиромагнитное отношение, G – амплитуда диффузионного градиента, δ – длительность каждого диффузионного градиента, Δ – интервал между двумя диффузионными градиентами. Единицей измерения b является с/мм².

Для устранения влияния T2 ткани на интенсивность МР-сигнала на изображении вычисляют параметрические диффузионные карты, на которых зависимость интенсивности сигнала от T2 ткани исключена. Для этого в диффузионной МРТ проводят измерения два раза. Первый раз получают изображение, взвешенное только по T2, для чего задают $b = 0$ с/мм²; обозначим интенсивность МР-сигнала на этом изображении $A(0)$. Второй раз измерения проводят при отличном от нуля b-факторе (при исследованиях головного мозга обычно выбирают $b = 1000$ с/мм²) и задают направление, вдоль которого измеряется изменение фазы сигнала за счет диффузионного движения.

Интенсивность сигнала на этом изображении обозначим $A(b)$. Ослабление МР-сигнала за счет диффузионного движения (D) рассчитывают по формуле:

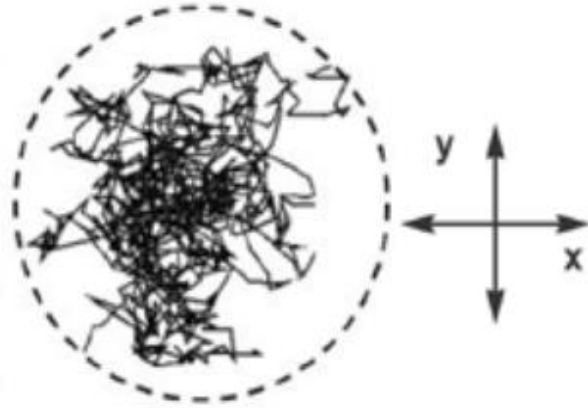
$$\ln (-A(b)/A(0)) = -b \cdot D, \quad (*)$$

где $A(0)$ – амплитуда эхо-сигнала в отсутствие диффузионных градиентов, зависящая только от T2 ткани, $A(b)$ – амплитуда эхо-сигнала, полученная при действии диффузионных градиентов и зависящая и от T2, и от скорости диффузионного движения вдоль направления приложения ДГ, D – коэффициент диффузии вдоль направления действия ДГ.

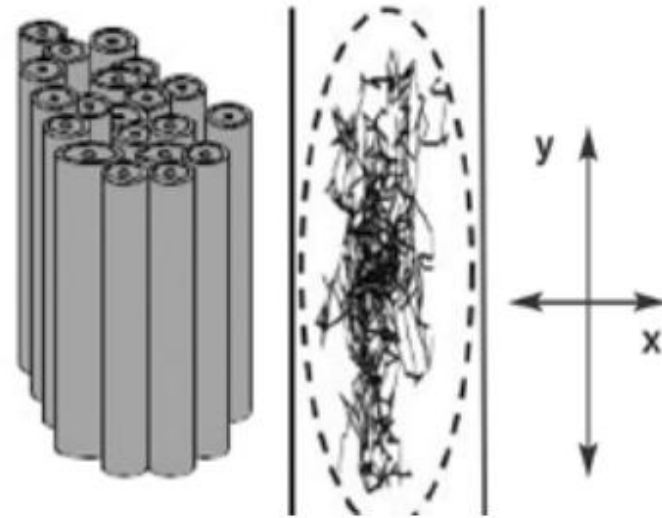
Величина, которая получается при измерении коэффициента диффузии воды в сложной среде в направлении действия ДГ методом ЯМР называется «действительный (измеряемый, или apparent) коэффициент диффузии» – ADC (русский эквивалент ИКД). Это связано с тем, что биологические, живые ткани не являются изотропными средами для движения молекул воды, которое происходит как внутри клетки, так и в межклеточном пространстве: клеточные мембраны и структуры ограничивают движение молекул воды, оставляя им некоторую свободу для лавирования между препятствиями при перемещении. Зависимость диффузионной способности молекул в биологической среде от направления называется анизотропией диффузии.

Количественными показателями ДТ-МРТ является фракционная анизотропия (ФА) и средний коэффициент диффузии (СКД). Средний коэффициент диффузии характеризует усредненное тепловое хаотическое движение молекул в среде и зависит от размера и целостности клеток. Фракционная анизотропия отражает различие свойств среды по разным направлениям внутри этой среды и характеризует степень направленности структур и их целостность. Значения показателя ФА измеряется в диапазоне от 0 до 1, где 0 - это максимальная изотропная диффузия в идеальной сфере, 1 – максимальная анизотропная диффузия в гипотетическом длинном цилиндре с минимальным диаметром.

Диффузия молекул воды



Изотропная диффузия.



Анизотропная диффузия.

Диффузионная анизотропия неоднородна в отделах белого вещества и отражает различие в миелинизации волокон, диаметре и их направленности. Высокое значение ФА характерно для миелинизированных волокон вследствие их плотного расположения и определяет наиболее частую диффузию молекул воды вдоль аксонов. При возникновении патологического процесса, который приводит к изменению микроструктуры белого вещества: разрыву, дезорганизации и уменьшению количества волокон в сочетании с повреждением миелина и изменением объема

внеклеточного пространства, показатели диффузии и анизотропии также меняются.

При построении двухмерных цветных карт ФА определяется направление диффузионной анизотропии молекул воды.

В зависимости от тканевых характеристик вещества головного мозга выделяют зоны:

- низкой анизотропии (например, серое вещество головного мозга) – голубые и желтые цвета,*
- высокой анизотропии (структуры мозолистого тела) – красный цвет.*

Направление диффузионного движения молекул воды на двухмерных картах определяется цветом в зависимости от ориентации их вектора:

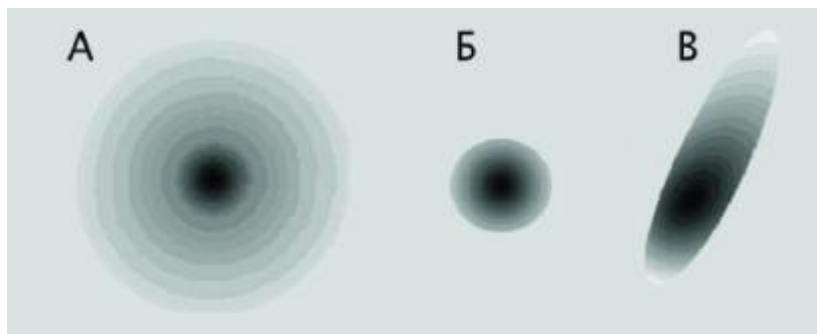
- красным (по оси X) – диффузия слева направо (комиссуральные волокна),*
- зеленым (по оси Y) – спереди назад (ассоциативные волокна),*
- синим (по оси Z) - сверху вниз (проекционные волокна).*

Для описания свойств диффузии, которые изменяются со сменой направления, используется математика тензоров. Диффузионные свойства молекул воды в веществе полностью описываются девятью значениями (D_{xx} , D_{xy} , D_{xz} ...) переменной D_{ij} с индексами i и j , которые заменяют одну из букв x , y , z . Набор из 9 чисел D_{ij} называется тензором второго порядка (по числу индексов). Тензор второго порядка часто записывают в виде таблицы:

$$D = \begin{matrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{matrix}$$

Тензор диффузии симметричен, т.е. $D_{xy} = D_{yx}$ и т.п. для любой пары индексов. Это свойство отражает физические свойства реальной среды, а именно: диффузионные свойства не изменятся, если начальную и конечную точки траектории молекулы поменять местами.

Благодаря симметрии тензора диффузии для характеристики диффузионных свойств молекул воды (протонов) в ткани достаточно шести коэффициентов тензора – трех диагональных и трех недиагональных. Геометрически диффузионное движение в сложной среде можно описать некой областью, в которой может происходить движение молекул. Эта область в простейшем случае свободного, неограниченного движения имеет форму шара, при наличии слоев, препятствующих движению молекул воды, она принимает форму диска, при движении молекул в узком канале движение ограничено длинным узким эллипсоидом «игольчатой» формы .



Типы диффузионного движения:

A – свободная диффузия,

B – равномерно ограниченная (изотропия),

B – неравномерно ограниченная (анизотропия диффузии)

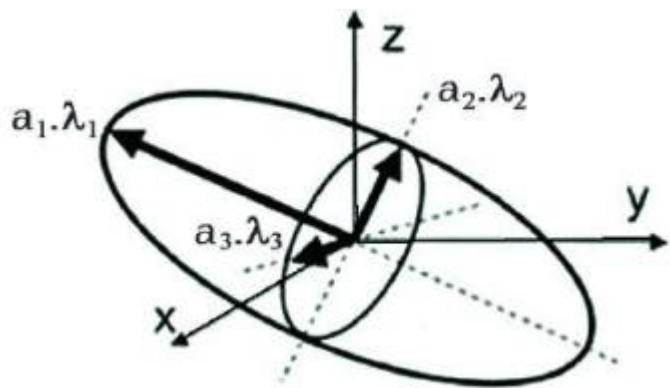
Шесть коэффициентов тензора диффузии точно определяют форму эллипсоида диффузии, его размеры и ориентацию в пространстве. Изотропия диффузии означает, что диффузионное движение молекул не зависит от ориентации среды и за время наблюдения молекула не выйдет за пределы сферы радиуса r :

$$r = (D_{xx} + D_{yy} + D_{zz})/3$$

Анизотропия диффузии предполагает, что смещение блуждающей частицы зависит от ориентации среды и за время наблюдения молекула будет находиться внутри так называемого «эллипсоида диффузии». Для анизотропной среды всегда можно повернуть систему координат так, чтобы ее оси (x-y-z) совпали с направлением главных осей эллипсоида диффузии (x'-y'-z'). В новой системе координат все недиагональные элементы тензора диффузии обратятся в ноль, и тензор диффузии примет вид:

$$D = \begin{pmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{pmatrix}$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ – это главные диффузионные коэффициенты (или собственные значения диффузионного тензора), соответственно, вдоль трех взаимно перпендикулярных главных осей X'Y'Z'. Обычно собственные значения нумеруют в порядке возрастания по величине, т.е. $\lambda_x > \lambda_y > \lambda_z$.



Ориентация, размер и форма эллипсоида диффузии в вокселе, построенном по измерениям коэффициента диффузии (ИКД), проведенным при действии диффузионных градиентов по шести направлениям. $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – собственные значения диффузионного тензора, a_1, a_2, a_3 – собственный вектор диффузионного тензора

Геометрически эти три числа представляют собой длины отрезков, образованных точками пересечения эллипсоида диффузии с координатными осями. Три собственных значения диффузионного тензора задают собственный вектор тензора диффузии и полностью определяют размер, форму и ориентацию эллипсоида диффузии, соответствующего тензору диффузии D . При $\lambda_x \gg \lambda_y, \lambda_z$ эллипсоид имеет «игольчатую» форму, он вытянут вдоль оси x , при $\lambda_x \approx \lambda_y, \lambda_z \rightarrow 0$ эллипсоид будет сплюснен (как блин) в направлении Z .

Сумма диагональных компонент любого тензора (эта сумма называется следом тензора) всегда остается постоянной:

$$D_{xx} + D_{yy} + D_{zz} = \text{след}(D) = \text{const}$$

Это свойство тензора диффузии использовано при вычислении параметрической карты по средней диффузионной способности – D_{av} , численно равной следу диффузионного тензора:

$$1/3 \text{ След}(D) = 1/3 (D_{xx} + D_{yy} + D_{zz}) = 1/3 (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = D_{av} .$$

Ориентация эллипсоида диффузии (степень анизотропии) определяется разбросом величин собственных значений, или дисперсией, и ее оценивают с помощью коэффициента несферичности, или анизотропии.

Чаще всего оценивают коэффициент частичной анизотропии (FA)

$$1/3 \text{ След } (D_{cp}^2) = [(\lambda_1 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_2 - \langle \lambda \rangle)^2 + (\lambda_3 - \langle \lambda \rangle)^2] / 3 = \text{ дисперсия } (\lambda) = FA$$

Кроме того, иногда используют и другие метрики анизотропии, например, объемное отношение (VR) или индекс анизотропии (AI):

$$VR = V_{\text{эллипс}} / V_{\text{сферы}} = 27 (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3) / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

$$AI = 1 - VR$$

где $V_{\text{эллипс}}$ – объем эллипсоида диффузии, $V_{\text{сферы}}$ – объем сферы при изотропной диффузии со средним коэффициентом D_{av} .

Метод визуализации диффузионного движения

Для вычисления среднего коэффициента диффузии, коэффициента анизотропии и координат собственного вектора диффузии для каждого вокселя исследуемого головного мозга измеряют ИКД минимум для 6 направлений ДГ (неколлинеарных и некопланарных) – q_i . Направление q_i задается схемой включения диффузионных градиентов G_x, G_y, G_z и их амплитудой. Например

$$\begin{array}{cccccc} 1 & 0 & 0 & 1 & 2 & 2 \\ q_1 = 0 & q_2 = 1 & q_3 = 0 & q_4 = 1/\sqrt{2} \cdot 0 & q_5 = 1/\sqrt{5} \cdot 0 & q_6 = 1/\sqrt{5} \cdot 0, \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 \end{array}$$

которые представляют собой линейные (по направлению q_i) диффузионные коэффициенты D_i по формуле ()*

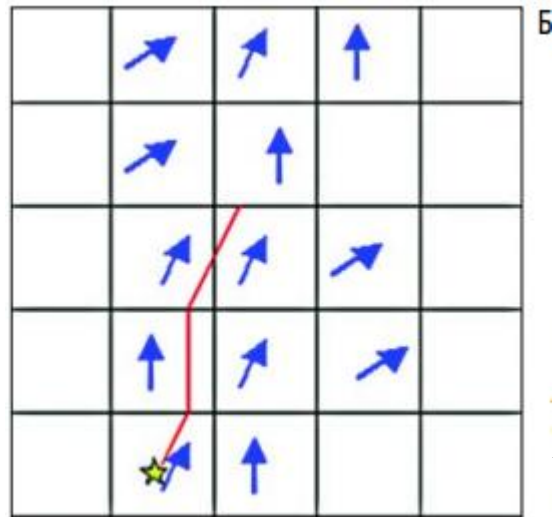
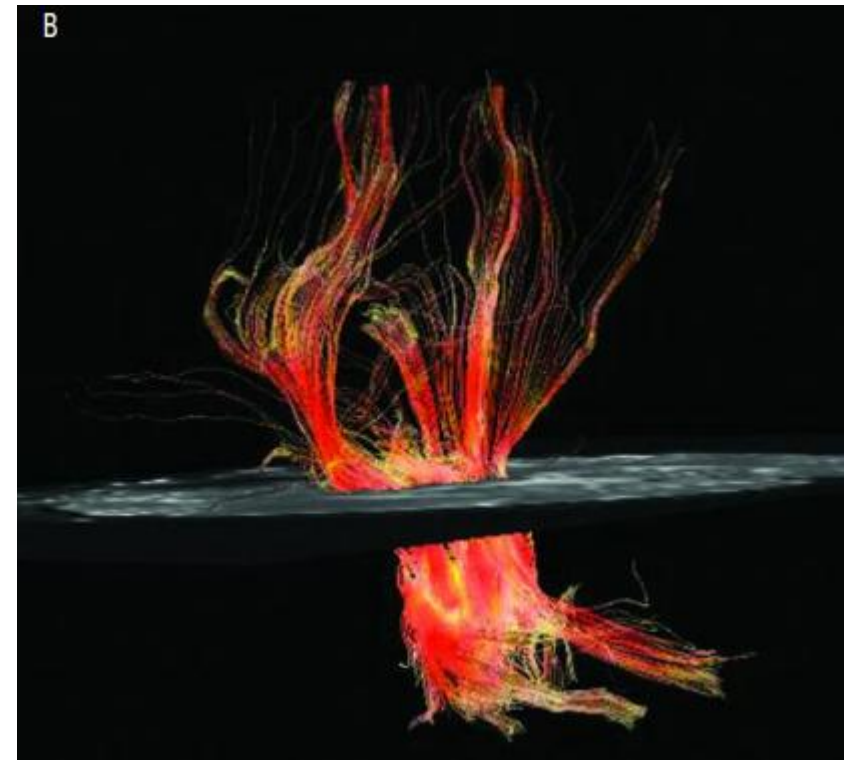
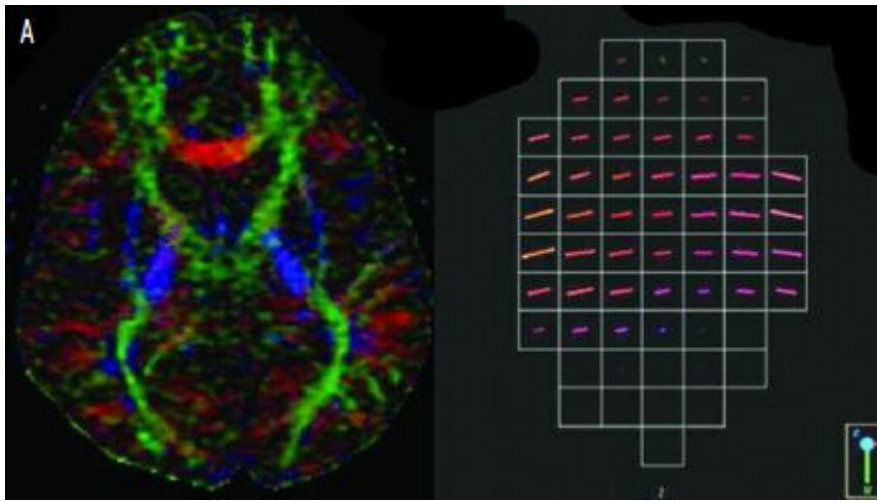
Коэффициенты тензора диффузии D_{ij} связаны со значениями линейных диффузионных коэффициентов D_i и направлением градиента q_i по формуле:

$$D_i = q_i^T \cdot D_{cp} \cdot q$$

где q_i^T – транспонированный вектор q_i , D – тензор диффузии. Решая систему линейных уравнений, находят значения коэффициентов тензора диффузии D для каждого воксела. Дальнейшая обработка данных состоит в нахождении собственных значений и собственных векторов тензора диффузии для каждого воксела. Таким образом, наиболее важными количественными параметрами, которые дает ДТ МРТ, являются три собственных значения тензора диффузии, средний коэффициент диффузии и коэффициент анизотропии.

В тензорной МРТ все действующие градиенты импульсной последовательности (включая адресные) дают дополнительное взвешивание по диффузии. Для коррекции вклада адресных градиентов, измерения линейных коэффициентов диффузии проводят не по шести, а по 15, 25 и более направлениям. Время регистрации и обработки данных при этом увеличивается, но повышается точность вычисления компонент диффузионного тензора, что важно для трактографии – метода визуализации хода нервных волокон.

Визуализация объемных тензорных полей осуществляется двумя методами: «классическим» методом (окрашиванием определенным цветом пикселей в зависимости от ориентации собственного вектора: красным – по x , зеленым – по y , синим – по z , а частичная анизотропия диффузии кодируется яркостью) и текстурным интегрированным методом – тракты волокон формируются в виде линий. Такой метод визуализации хода нервных волокон называется однотензорной трактографией (single tensor tractography).



Визуализация объемных тензорных полей окрашиванием определенным цветом пикселей в зависимости от ориентации собственного вектора (красным – по x , зеленым – по y , синим – по z)

***A* – значение частичной анизотропии диффузии кодируется яркостью;**

***B* – построение хода нервного волокна («нити») определяют, анализируя ориентацию эллипсоидов диффузии в соседних вокселях, начиная из заданной «исходной» точки;**

***B* – тракты волокон формируются в виде «нитей». Каждую «нить» можно строить, задавая либо «исходную» и «конечную» области, либо от исходной точки до естественного окончания наиболее вероятного пути**

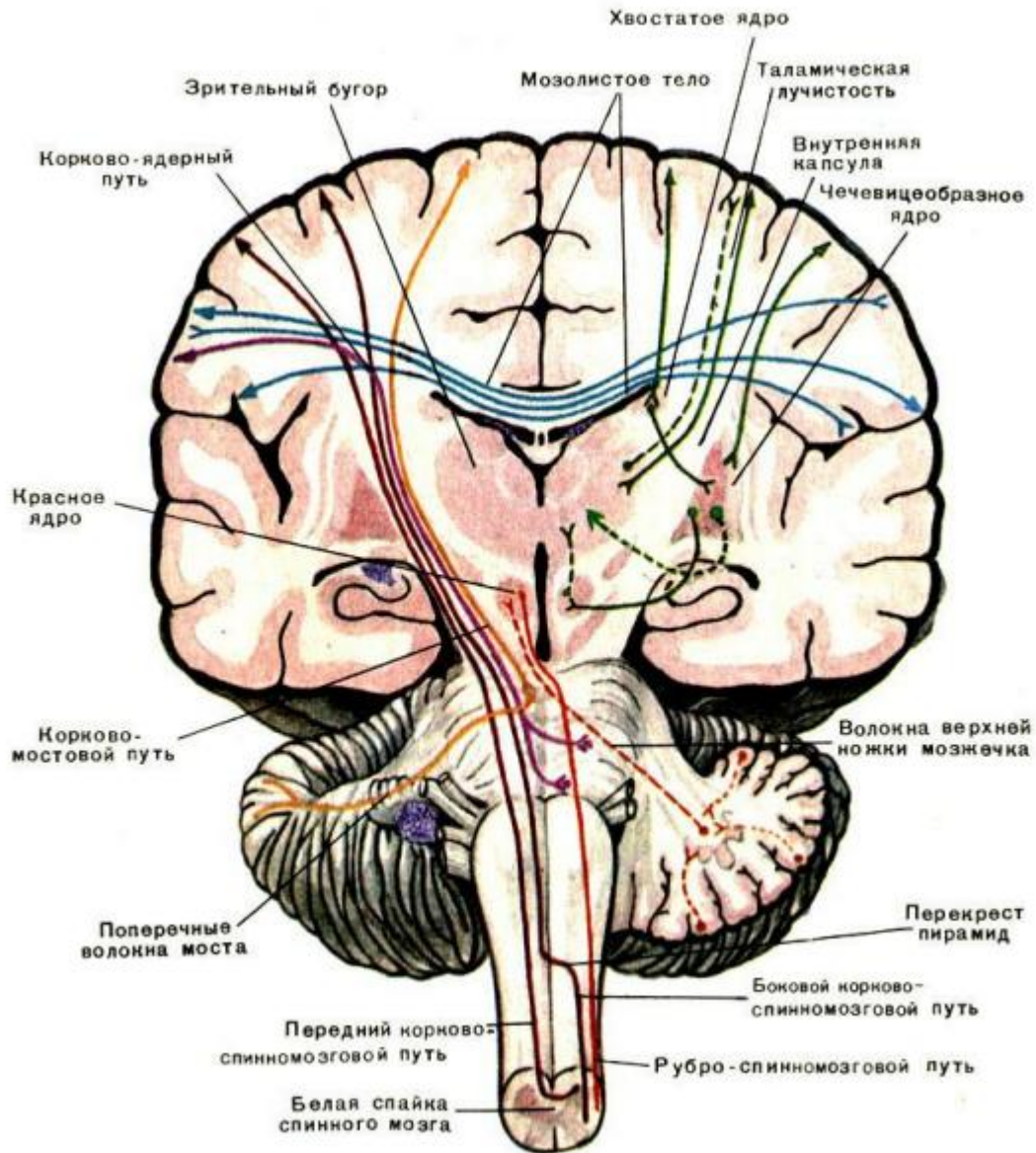
В нервной системе возникающие при воздействии на рецепторы, импульсы передаются по отросткам на нейроны. Это осуществляется благодаря синапсам, выполняющим функцию смыкателя или размыкателя нейронов.

Проводящие пути это совокупность нервных волокон, проходящих в определенных зонах белого вещества головного и спинного мозга, объединенных областью морфологического строения и функций.

В спинном и головном мозге выделяют по строению и функции следующие группы проводящих путей:

- 1. Ассоциативные пути соединяют участки серого вещества, различные функциональные центры (кора мозга, ядра) в пределах одной половины мозга. Выделяют короткие и длинный ассоциативные волокна. Короткие волокна соединяют участки близлежащего серого вещества. Длинные волокна связывают участки серого вещества, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, обычно в различных зонах. К ним относятся верхний продолговатый пучок, соединяющий кору лобной доли с теменной и затылочной, нижний продолговатый пучок, связывающий серое вещество височной доли с затылочной долей;*
- 2. Коммиссуральные (спаячные) нервные волокна, связывающие нервные центры (серое вещество) правого и левого полушария большого мозга, они образуют мозолистое тело (коммистру), спайку свода и переднюю спайку. В мозолистом теле располагаются волокна соединяющие новые, более молодые отделы мозга. В белом веществе полушарий волокна мозолистого тела расходятся веерообразно, образуя лучистость мозолистого тела.*

3. *Проекционные волокна соединяют нижележащие отделы с базальными ядрами и корой и наоборот, кору головного мозга, базальные ядра с ядрами мозгового ствола и спинным мозгом. Выделяют проекционные восходящие и нисходящие пути. Восходящие (афферентные, чувствительные) несут импульсы, идущие от органов чувств, опорно-двигательного аппарата, внутренних органов и сосудов в головной мозг к его подкорковым и высшим центрам.*



Проводящие пути головного мозга человека

Построение хода нервного волокна («нити») определяют, анализируя ориентацию эллипсоидов диффузии в соседних вокселях, начиная из заданной «исходной» точки.

Каждую «нить» можно строить, задавая либо «исходную» и «конечную» области, либо от исходной точки до естественного окончания наиболее вероятного пути

Существуют методы мультитензорной трактографии. В этом случае используют 15, 35, 41 и более направлений для измерения ДВИ. В работах D.S. Tuch (2004) и K. Yamada (2007) по серии ДВИ, полученной для 35 направлений, определяют ориентацию двух и более эллипсоидов диффузии (по 6 направлениям для каждого эллипсоида). В этом случае возможно скорректировать ход нервных волокон в местах пересечения и разветвления трактов, особенно крупного с мелким.

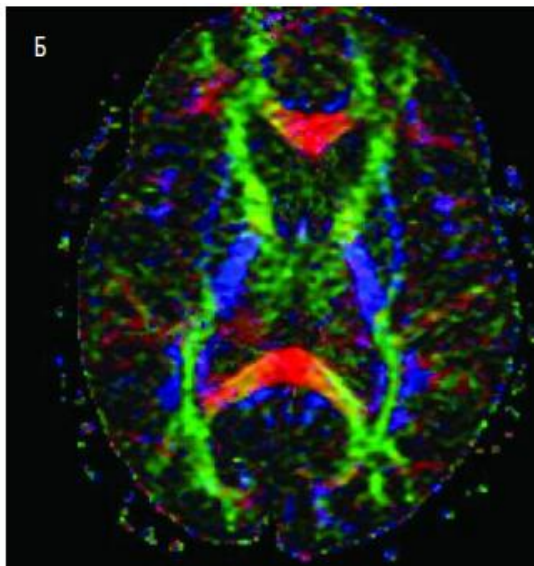
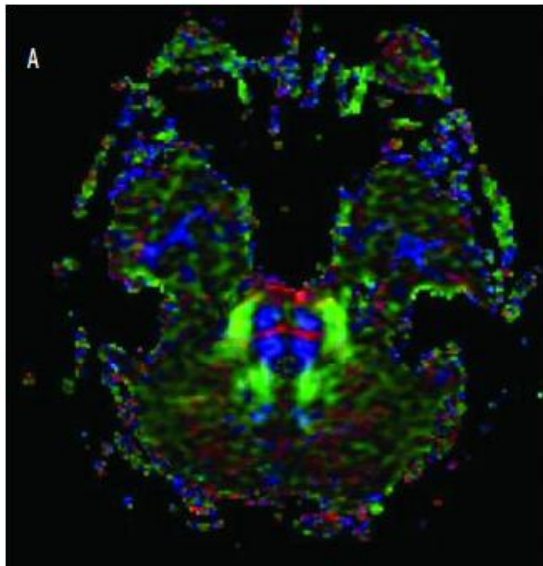
*Для построения мелких, ответвляющихся от крупных, трактов используют сложные алгоритмы выделения хода нервных волокон, например, методы структурного моделирования, метод *pdf*, связные модели, метод интегральных преобразований и метод сферических гармоник. Эти методы позволяют получить диффузионную тензорную МРТ высокого разрешения (HARDI).*

Основной интерес в представляемой работе сфокусирован на изучении возможностей данной методики в нейрохирургической клинике: определение топографии проводящих путей, степени воздействия опухоли, возможности совмещение с фМРТ в будущем, поддержка радиохирургии и др.

Тракты белого вещества головного мозга принято делить на три основные категории:

- комиссуральные – соединяют большие полушария.*
- ассоциативные – соединяют корковые структуры в полушарии.*
- проекционные – соединяют корковые, подкорковые и стволовые структуры.*

Для изучения топографии проводящих путей головного мозга группа ученых НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко РАМН (Москва) исследовали 5 здоровых добровольцев. Тензорная МРТ выполнялась с использованием 6 градиентов в аксиальной, фронтальной и сагиттальной проекциях. Как предварительный этап построения трактов мы реконструировали структурные цветовые карты на основе частичной анизотропии для каждого среза. Так, на аксиальной цветовой карте каждый цвет «отвечает» за свое направление: красный – справа налево, зеленый – спереди назад, синий – сверху вниз. Особенно четко ориентация пучков белого вещества выявляется в проекции ствола мозга



Структурные карты диффузии

А – изображения на уровне ствола мозга;

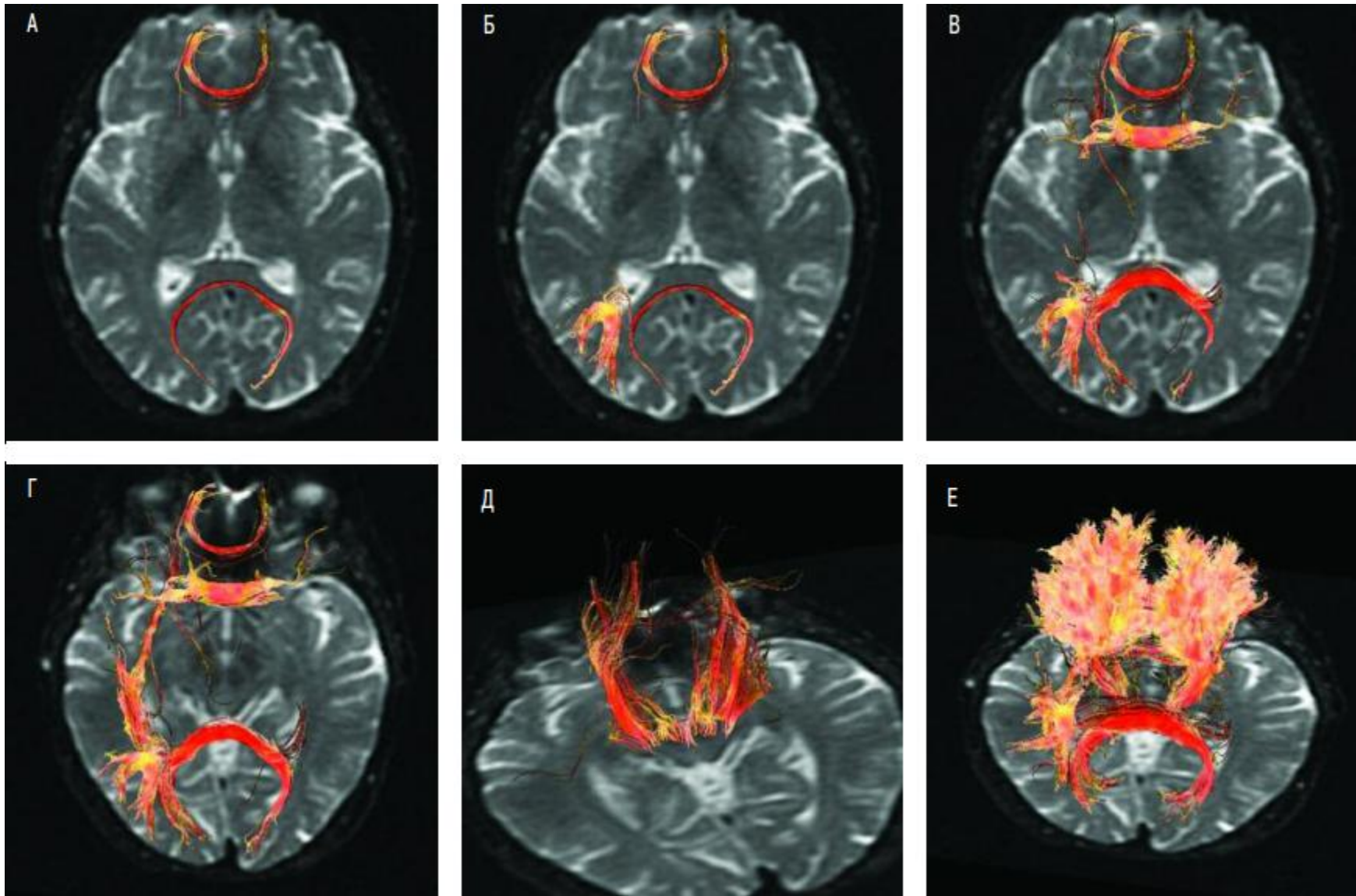
Б – на уровне боковых желудочков.

Цветом закодированы направления проводящих путей (красным – комиссуральные, зеленым – ассоциативные, синим – проекционные).

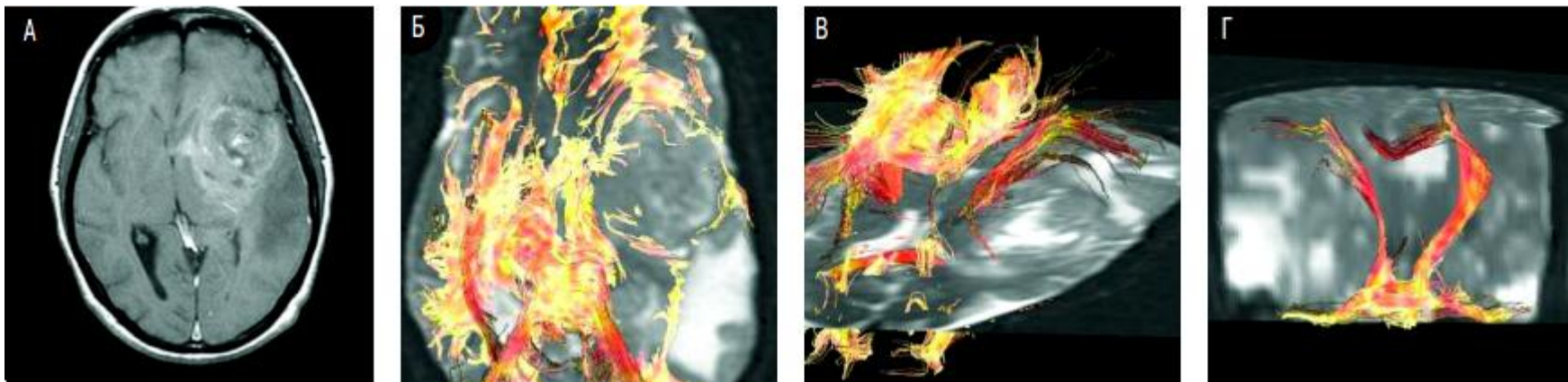
Затем проводилось построение отдельных проводящих путей в 3-мерном объеме и как завершающий этап – выстраивался весь объем трактов белого вещества мозга.

Ученые И.Н. Пронин, Л.М. Фадеева, Н.Е. Захарова, М.Б. Долгушин, А.Е. Подопригора, В.Н. Корниенко НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко РАМН, Москва рассмотрели методы визуализации трактов белого вещества головного мозга с помощью диффузионной тензорной магнитно-резонансной томографии (ДТ МРТ) и диффузионной тензорной трактографии (ДТТ) и оценили возможности применения новой методики в нейрохирургической клинике.

Ниже приведены примеры использования ДТ МРТ для определения топографии проводящих путей и степени воздействия на них опухоли головного мозга, что особенно важно на дооперационном этапе планирования хирургического вмешательства.

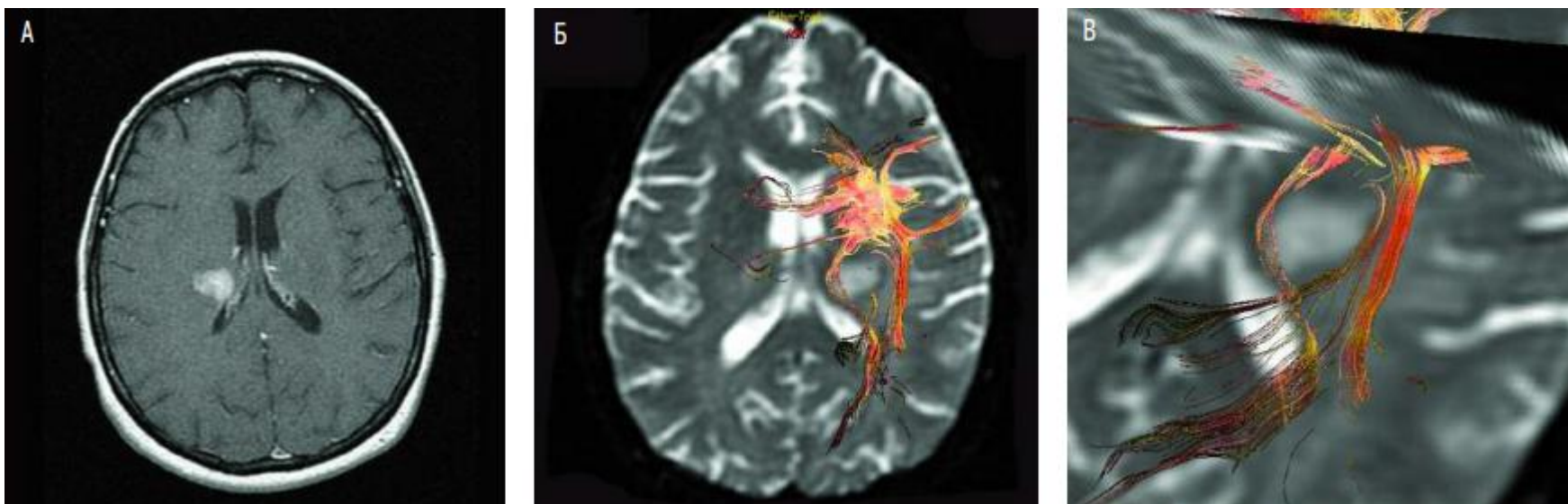


3-мерные трактографические карты. Изображение проводящих путей белого вещества мозга, изображенные в виде «нитей», наложенные на T2 изображение (А–Е).



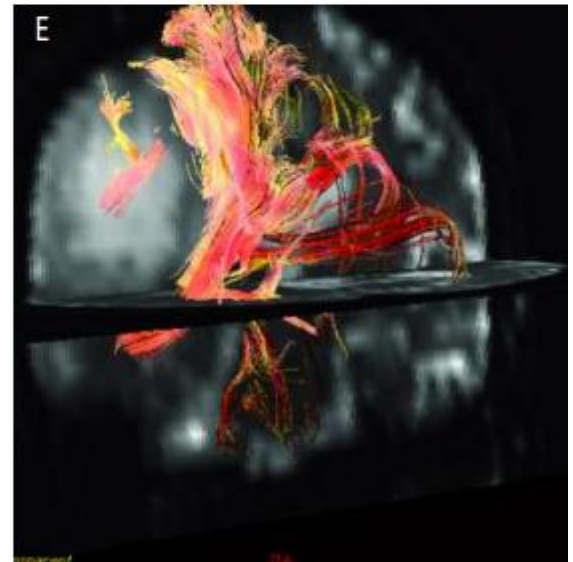
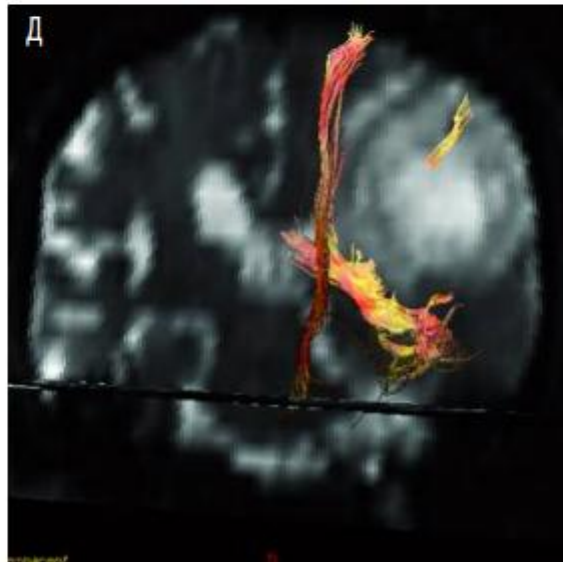
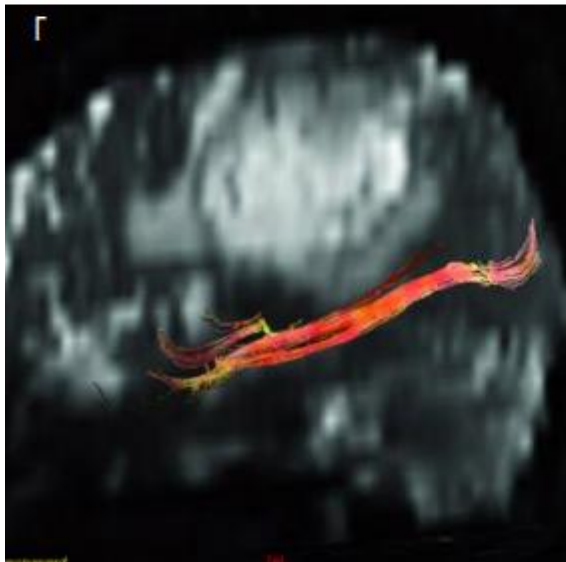
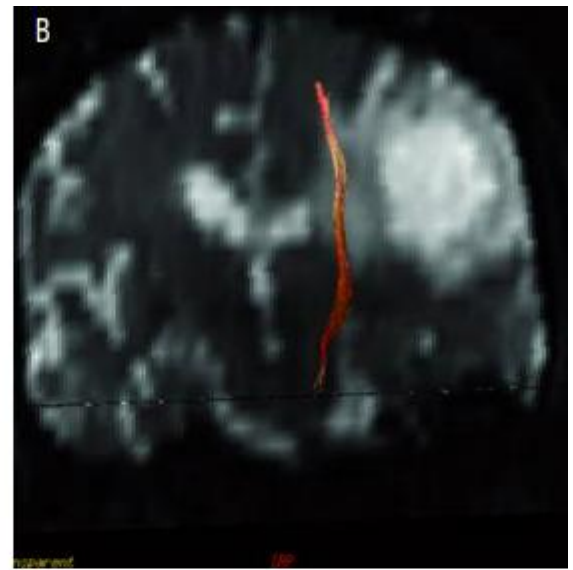
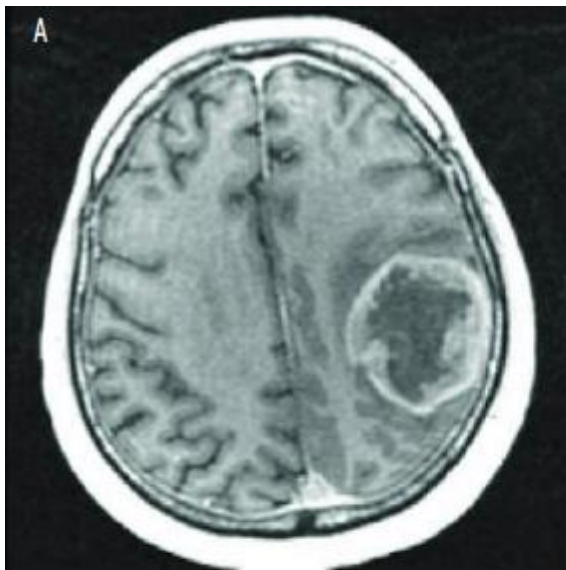
Глиобластома левой височной доли

А – T1-взвешенная МР-томограмма с контрастным усилением демонстрирует больших размеров опухоль с неоднородным контрастированием. Б–Г – МР-трактография определяет разрушение ассоциативных проводящих путей в зоне опухолевого роста. Кортикоспинальный тракт (Г) дислоцирован опухолью и проходит по медиальному ее контуру.



Солитарный метастаз в проекцию подкорковых образований справа

МР-томограмма в режиме T1 с контрастным усилением определяет небольших размеров опухолевый узел в проекции зрительного бугра и заднего колена внутренней капсулы (А). МР-трактография демонстрирует огибание проводящих путей вокруг метастаза.



Глиобластома левой заднелобно-теменной области

МРТ в режиме T1 на фоне контрастного усиления выявляет больших размеров опухоль с периферическим характером контрастного усиления (А, Б). МР-трактография с постепенным построением кортикоспинального тракта (В), нижнего продольного пучка (Г) и «комплекса» проводящих путей определяет локальную деструкцию в зоне опухоли и ее отношение к неповрежденным кортикоспинальному тракту и нижнему продольному пучку.