

И.М. Самохвалов¹, В.И. Бадалов¹, К.Е. Коростелев¹,
М.И. Спицын¹, К.В. Тюликов²,
П.Ю. Шевелев¹, Е.Г. Антонов¹

Нейронавигация как эволюция стереотаксиса

¹Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург

²Научно-исследовательский институт скорой помощи им. И.И. Джанелидзе, Санкт-Петербург

Резюме. Современная стереотаксическая нейрохирургия – это наука использующая высокотехнологичную методику точного воздействия на глубинные структуры и глубоко расположенные патологические образования головного мозга. В зависимости от заболевания воздействие на данные структуры и патологический очаг может быть переменным. Функциональная нейрохирургия использует стереотаксическую методику для проведения диатермодеструкции и имплантации электродов для хронической стимуляции ядер головного мозга при болезни Паркинсона, отдельных форм мышечной дистонии, постгерпетической невралгии тройничного нерва и ряда болевых синдромов. В нейроонкологии стереотаксическая методика нашла применение как малоинвазивная методика взятия биопсий с целью определения дальнейшей тактики лечения и для установки радиоактивных интрататов в брахитерапии опухолей головного мозга. Нефункциональная стереотаксия (нейронавигация) используется в хирургии при операциях на трубчатых костях, при повреждениях позвоночника, уха, горла, носа, проникающих ранениях, что позволяет значительно снизить интраоперационную лучевую нагрузку, интраоперационный травматизм, кровопотерю, время оперативного вмешательства и тем самым сократить время реабилитации пострадавших и финансовые затраты. Результаты ее использования демонстрируют превосходство над традиционными методиками. Приложения для интраоперационной навигации с визуальным управлением расширились в хирургии позвоночника – это артродез, ревизионные процедуры, случаи деформации с искаженной анатомией, а также использование при интрадуральных опухолях, внутримозговых гематомах. Кроме того, эти технологии могут при минимально инвазивных операциях смягчить большую часть воздействия радиации, которой подвергаются пациент, хирург и вспомогательный персонал операционной.

Ключевые слова: стереотаксическая нейрохирургия, функциональная нейрохирургия, нефункциональная стереотаксия, системы координат, стереотаксические атласы, биопсия, нейронавигация, новообразования, нацеливание, ориентация в пространстве, визуализация изображения.

Впервые термин «стереотаксис» был предложен английскими учёными – нейрохирургом V.H. Horsley и инженером R.H. Clarke [14], которые в 1906 г. создали прибор с координатной системой для операций на животных. Поводом для создания подобного аппарата послужила необходимость точной ориентации в мозге для прицельного введения в его структуры инструментов с целью исследования функций. Вклад R.H. Clarke заключался в том, что он связал внешний фиксированный к черепу аппарат с положением очага деструкции или точки – цели внутри черепа, используя картезианскую систему координат. Это позволило создать карты мозга животных (атлас), на которых было изображено местоположение многочисленных интракраниальных структур для хирургического доступа.

Профессор анатомии Московского университета Д.Н. Зернов [1] создал стереотаксический аппарат – энцефалометр, предназначенный для анатомических исследований и нейрохирургических операций на головном мозге человека, и продемонстрировал его в 1889 г. на заседании физико-математического общества Московского университета. Позже было опубликовано подробное описание энцефаломера и основные положения предложенной методики.

В 1908 г. R.H. Clarke, V. Horsley [14] запатентовали собственную модель для хирургических манипуляций на человеке и создали ряд усовершенствованных образцов.

C. Picard, A. Oliver, G. Bertrand [24] сообщают о том, что дело V. Horsley и R.H. Clarke в 1920-х годах продолжил A. Mussen. Он сделал копию их аппарата и использовал его для изучения работы ствола головного мозга и красного ядра у обезьян [21]. На тот период времени исследования A. Mussen не убедили нейрохирургов в возможностях использования аппарата для хирургии людей.

P.L. Gildenberg [10] сообщает, что E.A. Spiegel и G.T. Wyck в Филадельфии между 1940 и 1950 годами развили стереотаксическую методику, будучи первыми, кто выполнил стереотаксические операции на людях. Авторы после адаптации оригинального аппарата V. Horsley и R.H. Clarke в 1947 г. впервые создали первый практически применяемый в медицине стереотаксический аппарат.

Расчёты доступа к образованиям головного мозга при работе на этом аппарате производятся в прямоугольной системе координат. Созданное ими устройство называлось stereoencephalotome. E.A. Spiegel

занимался исследованиями в области психохирургии. Он проводил хирургическое лечение психических нарушений посредством dorsoiniedial thalamotomy, прерывая thalamofrontal связи с меньшим количеством побочных эффектов, чем при prefrontal lobotomy. Клинический опыт G. T. Wycis и E. A. Spiegel [31] привел к совершенствованию энцефалотома в отношении гибкости в выборе цели и выборе траектории доступа к ней.

Проблема, которая мешала применению стереотаксиса у человека, – это анатомическая пространственная изменчивость. Подкорковые структуры не могли быть надёжно соотнесены к костным поверхностным ориентирам черепа, поскольку это характерно только для маленьких животных. Для локализации человеческих подкорковых целей были необходимы глубокие ориентиры стереотаксической привязки, такие как структуры желудочковой системы. E. A. Spiegel и G. T. Wycis были первыми, кто для локализации глубоких подкорковых целей использовал такие визуализируемые на этих изображениях внутримозговые ориентиры, как задняя комиссура, пинеальная железа и отверстие Монро, что позволило корректировать стандартные размеры, полученные из атласов, и соотнести их с геометрией конкретного пациента [29].

Далее их функциональный опыт, привязка феноменов к определённым структурам – ориентирам позволили создать первый человеческий стереотаксический атлас мозга. В сущности, этот атлас включал их полный клинический опыт, который мог бы тогда использоваться как основа для выбора цели в мозге конкретного пациента. Точность их методики основывалась на применении ортогональных рентгенограмм и контрастной вентрикулографии с разработанной ими методикой коррекции дивергенции рентгеновских лучей, а также на системе координат, связанной с вентрикулярными ориентирами.

История развития. В 1949 г. L. Leksell [18] разработал первый стереотаксический аппарат, в котором использовались полярные координаты в сочетании с возможностью их перевода в прямоугольную систему координат. Аппарат состоял из полукруглой дуги. Сама дуга при вращении на 180 градусов формирует полусферу. В данном аппарате шкалы для расчётов по рентгенограммам лежат в разных плоскостях, что намечает траекторию доступа к цели. В связи с этим методика предусматривала систему математических расчётов (в те годы – с помощью логарифмов и диаграмм). После проведённых расчётов дуга должна была устанавливаться в такое положение, чтобы её центр точно совпадал с интракраниальной точкой цели. Направитель электродов мог передвигаться на 180 градусов по дуге, которая, в свою очередь, могла вращаться на 180 градусов сферы. Эти степени свободы позволяли выбрать любую желательную линейную траекторию и точку входа для данной цели. Подобное преимущество дугоцентриро-

ванных стереотаксических систем в дальнейшем позволило использовать стереотаксическую методику для локализации опухолей головного мозга, места трепанации и церебротомии.

В начале 1950-х годов J. Riechert and F. Mundinger [27] предложили аппараты, в которых межкомиссуральная линия (intercommissural AC-PC) использовалась как основа для привязки атласа к мозгу пациента. Авторы впервые применили фантомное устройство как механическое средство для перевода картезианской системы атласа в полярную систему координат стереотаксической рамы. Методика все еще используется во многих современных системах, поскольку это упрощает ручную установку рамки при обслуживании, а также является дополнительным способом проверки точности расчётов координат [4].

Последующие достижения в рамочной технологии включали аппараты Talairach с решением проблемы дивергенции методом телерентгенографии. M. P. Heilbrun [13] сообщает, что M. Todd и S. Wells создали модель стереотаксического аппарата, в котором голова пациента укладывалась в пределах дугоцентрированного устройства так, что точка цель находилась в фокусной точке рамы, что создавало удобство при работе с аппаратом. В дальнейшем P. J. Kelly [16] применил принцип аппарата M. Todd и S. Wells для создания своего устройства, совместимого с компьютерной томографией (КТ), и использовал его для работы со стереотаксическими ретракторами и лазером.

В последующие годы описаны другие модификации стереотаксических аппаратов: H. Narabayashi, V. Buren, S. Kandel, O. Gouda и M. Gibson. Публикации этих авторов относятся соответственно к 1952, 1960, 1970 и 1980 годам [22].

После осуществления первых стереотаксических подкорковых манипуляций для лечения психических отклонений и хронической боли многие хирурги нашли стереотаксические методики наиболее подходящими для воздействия на подкорковые структуры с лечебной целью при двигательных нарушениях, в частности при треморе у пациентов, страдающих болезнью Паркинсона. Также изучены методики воздействия на вещество мозга при стереотаксических операциях.

В 1950–1960-х годах были созданы центры стереотаксической хирургии во Франции (Hecaen and Guiot), в Германии (Riechert and Wolff), в России (Бехтерева, Кандель, Нестеров), в Японии (Narabayashi), в Великобритании (Gillingham), в Финляндии (Laitinen, Toivakka), в Канаде (Bertrand. Jasper), в Мексике (Velasco-Suarez. Escobedo), в Испании (Obrador). Руководителями этих центров было предложено несколько конструкций инструментов для биопсии и описана методика планирования доступа к образованию с алгоритмом забораткани. Так, T. Riechert, F. Mundinger [27] первыми предложили использовать стереотаксис как на-

вигационный инструмент для достижения глубоких артериовенозных мальформаций (АВМ). Они применили рамочную стереотаксическую систему для поиска и атравматичного удаления подкорковых и паравентрикулярно расположенных малых артериовенозных мальформаций. Современный подход к хирургическому атравматичному удалению сосудистых образований возник в результате совмещения КТ, магнитно-резонансной томографии (МРТ) и стереотаксиса. S.A. Goerss совместно с P.J. Kelly [12] описали методику по локализации и удалению АВМ ретракторной системой, совмещенной с модифицированным аппаратом «Todd-Wells». Удаление мальформаций производилось посредством коагуляции карбоновым лазером. При использовании этой методики мальформация и питающие её сосуды могут быть локализованы стереотаксически по данным ангиографической разметки.

Е.О. Backlund в 1971 г. [4] применил оригинальную спираль для проведения стереотаксической биопсии опухоли, а также для эвакуации внутримозговых гематом. L.W. Conway [7] в 1973 г. опубликовал результаты проведённой стереотаксической биопсии глубоко расположенных опухолей мозга (опухоли хиазмально-селлярной локализации, глиомы таламуса, пинеаломы) у 31 больного. В 25 случаях была получена точная гистологическая верификация образования. Методика стереотаксического планирования доступа к опухолям головного мозга по данным КТ с целью забора ткани для гистологического исследования подробно описана у многих авторов.

Методику термокоагуляции питающих сосудов глубоко расположенных АВМ описали С.Ж. Chen et al. [6]. Авторы показали, что стереотаксическая ангиография даёт ценную информацию для определения пространственных отношений между приносящими артериями и дренажными венами при планировании их хирургического лечения.

Позднее Н. Voecher-Schwarz [5] представил данные о стереотаксическом удалении артериовенозных мальформаций с хорошими результатами у 12 пациентов из краниотомий средним диаметром 2,8 см и кортикотомий диаметром 1 см. Размер мальформаций составил 0,5–1,8 см, последние располагались на глубине 0,4–4,5 см от поверхности коры. Для локализации использовалась стереотаксическая система C'RW (Cosman-Roberts-Wells).

Приёмы стереотаксиса условно делят на две части: стереотаксическое наведение и стереотаксические воздействия. Стереотаксическое наведение необходимо для точного позиционирования области воздействия.

Основа стереотаксического наведения – геометрия, метод координат. Стереотаксическое наведение включает определение положения стереотаксических мишеней в пространстве и нацеливание на них стереотаксического инструмента [3].

Метод координат позволяет выразить в числах пространственное положение точек относительно какой-либо системы координат. В стереотаксисе используют несколько типов системы координат: прямоугольная система координат – три взаимно перпендикулярные плоскости, называемые координатными плоскостями. Точка пересечения координатных плоскостей – начало координат. Линии пересечения координатных плоскостей – оси системы координат, их обозначают латинскими буквами x , y , z . Положение любой точки в прямоугольной системе координат задаётся тремя числами – тремя координатами точки (три расстояния точки до координатных плоскостей). В полярной системе координат положение точки задаётся тремя числами – одним расстоянием (длина радиуса-вектора) и двумя углами. При постоянной длине радиуса-вектора полярная система координат превращается в экваториальную систему координат. Любая стереотаксическая методика содержит несколько систем координат.

В клиническом стереотаксисе прямоугольная система координат мозга строится по внутримозговым ориентирам, для чего чаще всего используют переднюю и заднюю комиссуры мозга. Ось x проходит через центры комиссур от затылка ко лбу, начало координат 0 – середина расстояния между комиссурами, ось z проходит от базальных отделов мозга к темени, ось y – слева направо (рис. 1).

Для повышения точности наведения в системах координат мозга можно использовать данные стереотаксического атласа. Стереотаксический атлас представляет собой обычно набор фотографий срезов мозга с изображениями мозговых структур, плоскости срезов строго параллельны координатным плоскостям системы координат. Правила построения системы координат стереотаксического атласа и системы координат мозга аналогичны. Это позволяет измерять в атласе координаты целевых точек и переносить их в системы координат мозга [2].

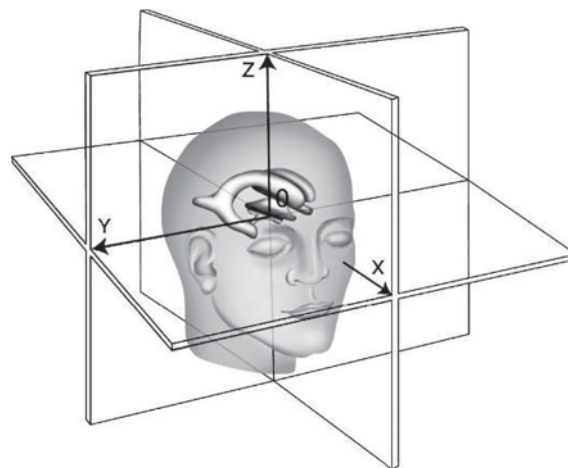


Рис. 1. Система координат мозга

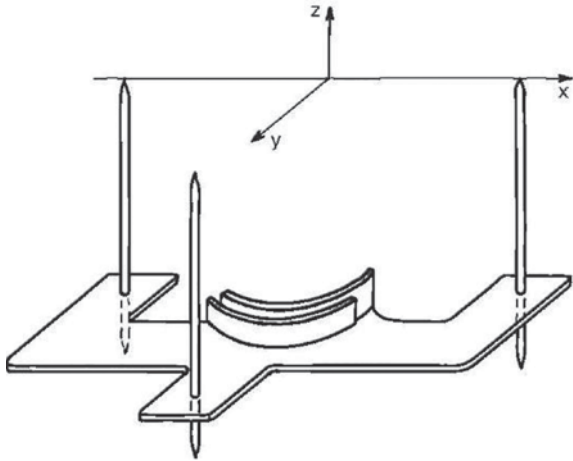


Рис. 2. Локализатор

Систему координат локализатора, так же как систему координат стереотаксического аппарата, относят к инструментальным системам координат. Локализаторы – устройства, которые фиксируются на голове пациента и содержат в своей конструкции модель прямоугольной системы координат (рис. 2). Различают рентгеновские локализаторы, КТ- локализаторы, МРТ-локализаторы, позитронно-эмиссионно томографические (ПЭТ)-локализаторы. Они позволяют определять координаты объекта по его рентгеновскому, КТ-, МРТ-, ПЭТ-изображению.

Стереотаксические системы – промышленно выпускаемые комплексы приборов, инструментов и компьютерных программ, предназначенные для проведения стереотаксических вмешательств. Наи-

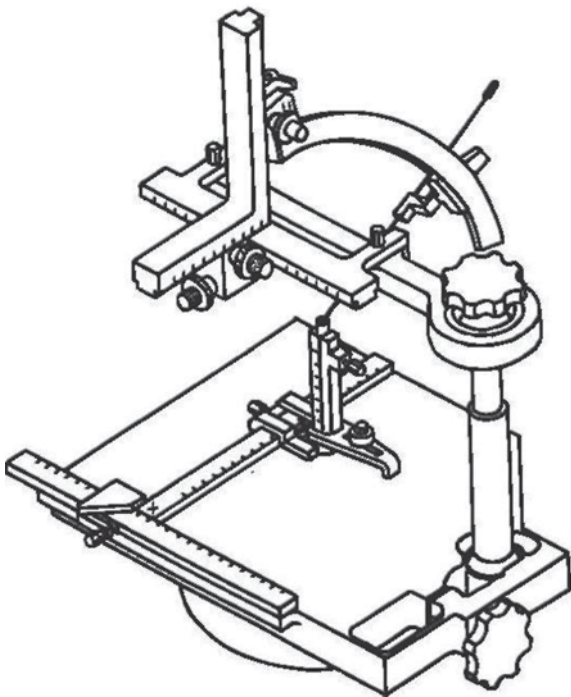


Рис. 3. Стереотаксическая система «Поаник»

более известные зарубежные стереотаксические системы – «Лекселл» фирмы «Электа» (Швеция), «Рихерт-Мундингер» фирмы «Фишер» (Германия), «БРВ» фирмы «Радионикс» (Соединенные Штаты Америки) и др.

Стереотаксическая система «Поаник» является отечественной компьютеризированной стереотаксической системой. Она разработана лабораторией стереотаксических методов Института мозга человека Российской академии наук и Государственным научным центром Российской Федерации Центрального научно-исследовательского института «Электроприбор» (рис. 3). Важное достоинство системы «Поаник» – атравматичная маркировка головы больного с помощью оттиска зубов пациента. При каждом прикусывании пациентом своего оттиска зубы верхней челюсти погружаются в соответствующие углубления оттиска, который занимает относительно черепа и мозга одно и то же пространственное положение. На оттиске могут быть поочередно зафиксированы локализаторы для рентгенографии, КТ, МРТ и ПЭТ. Благодаря этому возможно проведение интроскопии заблаговременно до операции без травмирования больного. Эта система позволяет проводить стереотаксические операции в нейрохирургических отделениях, которые не имеют собственного томографа, при этом интроскопическая подготовка может быть выполнена на томографе, географически удалённом от операционной.

Функциональный стереотаксис – методика, позволяющая с помощью специального инструментария влиять и менять функциональные возможности различных зон головного мозга. Он используется для наведения и воздействия на ядра и проводящие пути головного мозга с целью диагностики и лечения сложных хронических заболеваний центральной нервной системы, таких как паркинсонизм, органические гиперкинезы, эпилепсия, неукротимые боли, некоторые психические расстройства.

Стереотаксические воздействия, используемые в функциональной стереотаксии, можно разделить на три группы.

Первая (наиболее часто применяемая) группа – локальные необратимые разрушения структур – мишеней. Разрушению могут быть подвергнуты те структуры, которые служат очагами патологической гиперактивности, вызывающей характерные для данного заболевания клинические проявления, например эпилептический очаг. Однако гораздо чаще локальному разрушению подвергаются морфологически и биохимически интактные структуры, которые в мозге служат проводниками патологической активности.

Вторая группа – временные, обратимые воздействия. Они более щадящие, более «физиологичные». Например, обратимые холодовые выключения структур с помощью локального охлаждения до -10°C или диагностические и лечебные электрические стимуляции. Последние в зависимости от параметров

(частота, сила тока, экспозиция) могут вызывать функциональную активацию структуры или, наоборот, её дисфункцию.

Третья группа – трансплантация тканей, например ауто трансплантация тканей надпочечников или трансплантация эмбриональной ткани.

Нефункциональная стереотаксия не подразумевает прямого воздействия на вещество головного мозга, а используется для: 1) биопсии опухолей, 2) пункции абсцессов с их дренированием, промыванием полости абсцесса растворами антибиотиков и при необходимости осмотра стенок полости с помощью стереотаксически введённого эндоскопа, 3) эвакуации гематом, 4) стереотаксического удаления инородных тел. Для этого осуществляется наведение соответственно на опухоли мозга, абсцессы, гематомы, инородные тела. К нефункциональной стереотаксии можно отнести нейронавигацию.

Важным событием в области стереотаксической нейрохирургии было появление новых современных средств визуализации (КТ и позже МРТ). Прежде расчёты доступа к точке-мишени и выбор цели производился по интракраниальным ориентирам, полученным при помощи стандартного рентгеновского оборудования (ангиографии и вентрикулографии). Таким образом, возможности стереотаксиса согласовывались фактом наличия структурно неизменённого мозга, что удовлетворяло потребности функциональной нейрохирургии, но ограничивало использование методики в других её областях.

С появлением КТ, МРТ улучшилось качество диагностики, появилась возможность точно определить местоположение, размеры, форму и структуру интракраниальных образований. Возник стимул для прогресса в области стереотаксиса, заключавшийся в использовании данных КТ и МРТ для изучения стереотаксического пространства с целью локализации мишени и планирования хирургического доступа.

О совмещении КТ-технологий и стереотаксической методики было сообщено J.C. Maroon [19], который описал три наблюдения, где биопсия была спланирована по КТ данным. Автор сообщил об одном осложнении и одной смерти пациента, не связанных с процедурой.

Следующие публикации о результатах совмещения стереотаксиса и КТ принадлежат T.S. Roberts, R. Brown [28]. Авторы описали новую «Brown-Roberts-Wells» стереотаксическую систему, являющуюся модифицированной версией оригинала аппарата «Todd-Wells». Авторы подробно осветили алгоритм выполнения стереотаксических расчётов, а также компьютерное моделирование стереотаксического подхода.

Опыт применения модели рамочной стереотаксической системы «Cosman-Roberts-Wells» для локализации и удаления образований головного мозга глубинной локализации продемонстрирован в публикациях 1990 г. W.T. Couldwell [8].

В 2003 г. G.R. Stranjalis et al. [30] сообщили о результатах 118 оперативных вмешательств с КТ- и МРТ-локацией, как и на стереотаксической рамочной системе «Cosman-Roberts-Wells». Спектр хирургических манипуляций включал 62 биопсии опухолей, 22 резекции образований из миникраниотомий, 11 эвакуаций гематом, 8 аспираций абсцессов, 2 аспирации кистозных новообразований, 4 размещения вентрикулярных катетеров и 9 таламотомий. Автор сообщает о 5,9 % осложнений и о 2,5% смертности, что вписывается в результаты, полученные другими авторами: осложнения 0,9% 8,5%, смертность 0% 3,3%.

Несомненно, что информация, получаемая при МРТ, более информативна, чем при КТ. Поэтому планирование траектории доступа по реконструкциям МРТ наиболее удобно. Данные МРТ (в том числе МРТ с контрастированием опухоли) несут большую информацию о размерах, форме и границах новообразования. При этом на этапе планирования становится возможным оценить состояние прилежащих мозговых структур, а также участков мозгового вещества, расположенных на пути доступа. Тщательный анализ борозд с конвекситальными сосудами (по данным МРТ-ангиографии) обеспечивает выбор наименее безопасной и малотравматичной траектории.

С.А. Giller [11] описывает достижения в области нейрохирургии, которые тесно связаны с научно-техническими разработками в области стереотаксиса и скоростью их внедрения в клиническую практику. Так, стереотаксическое направление, получив передовые дорогостоящие технологии в 1980-е годы, неоспоримо реализовало себя, внося огромный вклад в повышение качества нейрохирургической помощи. Стереотаксическая методика, зародившаяся в начале XX в. и имевшая тогда задачи обеспечения нейрофизиологических исследований, в настоящее время легла в основу современного оборудования для сопровождения при хирургических вмешательствах на мозге человека. Истинно стереотаксическая методика с идеей односторонней передачи информации с косвенных, а затем и конкретных (КТ, МРТ) мозговых ориентиров на вещество мозга для точного попадания в определённые его структуры в наши дни позволяет обеспечить такую двухстороннюю связь [9, 17, 23].

Эта возможность заложена в различных безрамочных навигационных системах. Данные системы мгновенно производят обработку данных для обеспечения двухсторонней связи между мозгом пациента и его МРТ-, КТ- реконструкциями, существенно помогая хирургу, в какой-то мере расширяя его чувство пространственной ориентации.

Первые изобретения использовали ультразвуковые вспышки и микрофоны с целью совмещения данных КТ и операционного микроскопа – первый прототип безрамочной навигации на основе ультразвука. КТ-изображения модифицировались и видоизменя-

лись в соответствии с изменением положения операционного микроскопа. Использование акустических систем слежения позволило избежать сложностей с механическими препятствиями между микроскопом и системой слежения. Однако точность регистрации данных пациента в нейронавигационной установке составляла около 7 мм, что заставило авторов продолжить работу в данном направлении.

В 1990 г. H.F. Reinhardt et al. [26] из университета города Базеля сообщили о нейронавигационной установке, которая использовала рабочий инструмент, ориентируемый в пространстве с помощью ультразвука. Авторы изобрели систему, которая в лабораторных условиях показала высокую точность ($\pm 0,5$ мм). Однако в условиях реальной операционной точность системы резко падала (± 3 мм) при незначительных изменениях температуры, вызванной даже движением людей.

Точность нейронавигационной системы зависела от скорости звука, изменяющейся в зависимости от плотности среды (воздуха), которая в свою очередь зависит от влажности, температуры и газового состава, а эти данные могут меняться в течение операции. Также работу системы могли нарушить ультразвуковые сигналы, отражаемые от стен и пола. Систему можно было использовать только как устройство для уточнения места трепанации и обнаружения патологического очага.

В 1991 г. A. Kato et al. [15] сообщили о нейронавигационной системе, ориентирующейся в пространстве с помощью магнитного поля. Преимуществом данной навигационной системы является возможность перекрестия пространства между излучателями магнитного поля и рабочим инструментом, так как положение инструмента определяется градиентом магнитного поля. Недостатком использования данной системы является отказ от использования инструментов из стали и источников электромагнитных колебаний, в результате чего точность системы удалось довести до 4 мм. Использование нейронавигации с магнитным принципом действия возможно в условиях специальной операционной.

В 1996 г. H.F. Reinhardt et al. [25] представили нейронавигационную систему, ориентирующуюся в пространстве с помощью инфракрасного излучения. Положение рабочего инструмента в пространстве определялось при помощи электронно-оптической системы, состоящей из детекторных камер, создающих систему координат, а также из испускающих инфракрасное излучение светодиодов, располагающихся на рабочем инструменте.

Навигация сегодня – это инструмент, который используется практически во всех областях хирургии. Использование систем нейронавигации совершенно безопасно для пациента.

Комплекс навигационных систем, который вобрал в себя современные программные обеспечения, безрамные стереотаксические системы, возможность соединения с микроскопом и другими вспомога-

тельными устройствами, беспроводные высокоинтеллектуальные инструменты, обеспечивает высокую надежность и дает специалисту непревзойденную свободу действий.

Нейронавигация для операций на позвоночнике позволила качественно увеличить точность и объем резекций кости, повысила позиционирование имплантов. При этом количество снимков электронно-оптического преобразователя (ЭОП) при использовании навигации значительно снижается.

Программа FluoroNavigation 2D (при подключении обычного ЭОП) позволяет снижать интраоперационную лучевую нагрузку как на оперирующий персонал, так и на пациента в 3–4 раза, а также отслеживать репозиции и пространственное положение в режиме реального времени. Эта программа в полном объеме удовлетворяет все требования, необходимые для малоинвазивных и малотравматичных чрескожных вмешательств, при которых нет необходимости пользоваться дополнительными регистрациями [20].

Программа SpineMap 3D (использует результаты КТ, МРТ, поддержку подключения 3D-ЭОП). Процесс планирования осуществляется на основании КТ-серии, затем происходит слияние 3D-модели ЭОП и КТ, или совмещение с результатами МРТ-исследования и 3D-модели ЭОП (рис. 4). Следующий этап – это автоматическая регистрация КТ-модели по данным 3D-модели ЭОП. Эта функция идеально подходит при сложных деформациях и сколиозах, данные функциональные возможности можно использовать при травмах позвоночника и сложных деформациях, при дегенеративно-дистрофических изменениях позвоночника.

Для работы со структурами головного мозга чаще всего используется программа iNtellect Cranial. Данное программное обеспечение позволяет точно выйти на точку-мишень в головном мозге, снизить травматизацию мозга, количество осложнений и возможных ошибок. Здесь имеется широкий ряд опций для открытых и пункционных операций, экономичные и эффективные решения для биопсии и шунтирования, а также возможна поддержка трансназальных и транссфеноидальных доступов:

- малоинвазивные доступы с минимальным повреждением мозгового вещества, окружающего патологический очаг (опухоль, гематома, сосудистая мальформация, инсульт, инородное тело, абсцесс и т. д.), включая трансназальные доступы в область турецкого седла;

- точное позиционирование каждого инструмента во время операции, что опять же ведет к минимизации ятрогенного повреждения, снижению статистики осложнений, ранней реабилитации, повышению качества жизни пациента и затрат на пребывание в стационаре и фармакотерапию.

- детальное предоперационное планирование с расчетом координат и объема патологического очага

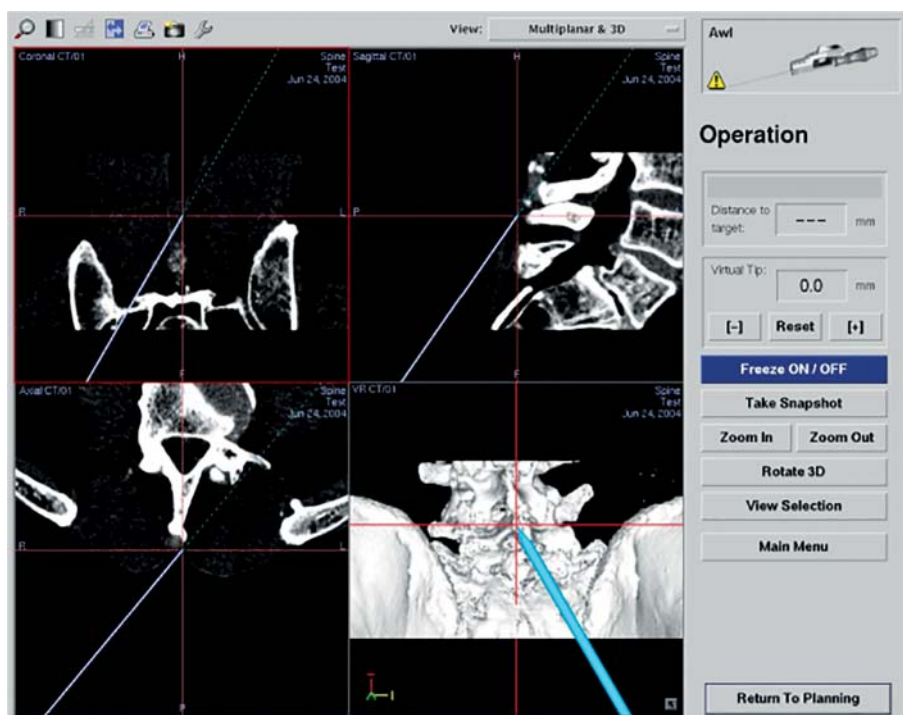


Рис. 4. Совмещение навигационного инструментария и анатомического атласа

и траектории доступа к нему (снижает время работы на открытом мозге, при постоянной практике – общее время операции);

- новые возможности в области создания и построения 3D-моделей анатомических структур (желудочки, сосудистая сеть, новообразования);

- полнообъемная визуализация сети нервных проводящих путей (трактография), рисунок 5.

Таким образом, преимущества использования нейронавигации трудно переоценить. Навигационные системы позволяют добиться лучших клинических результатов, будь то вмешательство на сосудах головного мозга или установка многоуровневой конструкции на позвоночник. В частности, они позволяют более тщательно спланировать этапы операции и контролировать её ход, тем самым снижая

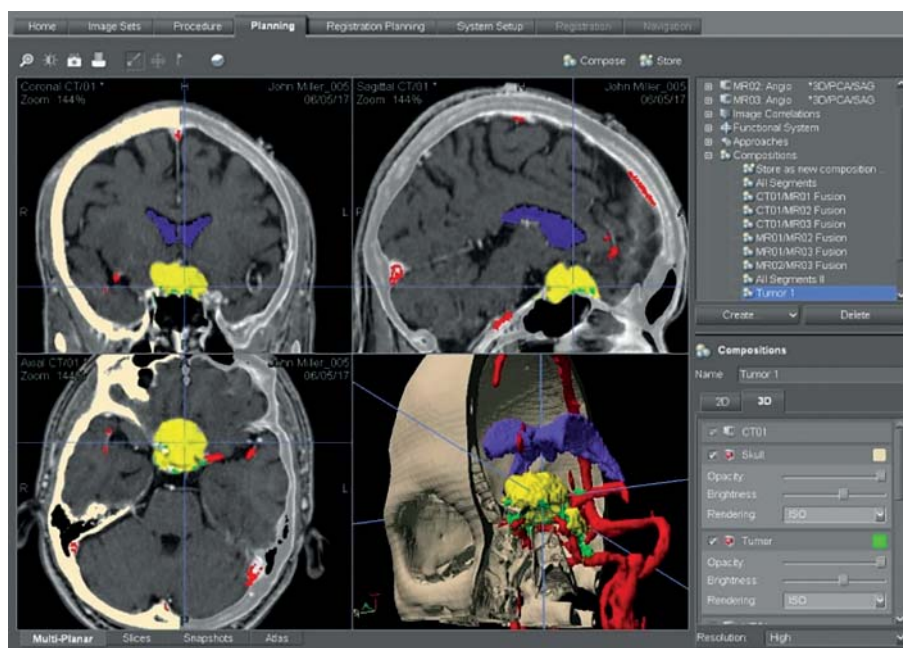


Рис. 5. 3D-визуализация анатомических образований и зоны хирургического вмешательства

количество возможных ошибок, неточностей и грубых ятрогенных осложнений. При таком воздействии снижаются риски негативных последствий операционной травмы, так как выход на цель осуществляется кратчайшим и наиболее безопасным неконтактным со смежными структурами и образованиями путем. Улучшение клинических результатов значительно корректирует общую картину статистики осложнений по результатам лечения, так как сокращаются время оперативного пособия, время пребывания в наркозе, кровопотеря, происходит сокращение в целом койко-дней и затрат на послеоперационную фармакотерапию.

Кроме того, к несомненным достоинствам навигационных систем можно отнести следующие:

- снижается инвазивность процедуры и кровопотеря, по мере овладения методикой – время операции и, как следствие, уменьшается время наркоза, а значит, достигается более ранняя реабилитация пациента;
- значительно сокращается интраоперационная лучевая нагрузка на участников операции и на пациента;
- является поддержкой и помощником для молодых врачей, которые делают первые шаги в освоении той или иной техники операций на различных анатомических областях;
- дает возможность специалистам овладеть новой прогрессивной методикой, представляет материал для научной работы, способствует активному взаимодействию с коллегами в других регионах и странах;
- снижает финансовые затраты на восстановление пациента и его обеспечение в процессе реабилитации.

Использование навигационных систем также позволяет клинике претендовать на присвоение высшей категории, на активное участие в разнообразных федеральных и региональных программах по оказанию и улучшению медицинской помощи пациентам. На государственном уровне появляется возможность создавать центры по оказанию высокотехнологичной качественной медицинской помощи.

Литература

1. Зернов, Д.Н. Энцефалометр. Прибор для определения положения частей мозга живого человека / Д.Н. Зернов. – М.: Печная мастерская С.П. Яковлева, 1892. – 13 с.
2. Можаяев, С.В. Нейрохирургия: учебник для вузов / С.В. Можаяев, А.А. Скоромец, Т.А. Скоромец. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 479 с.
3. Низковолос, В.Б. Реализация возможностей стереотаксических манипуляторов «Ореол» и «Низан» для решения клинических задач / В.Б. Низковолос // Мат. III съезда нейрохирургов России. – СПб.: МГВ, 2002. – С. 472–473.
4. Backlund, E.O. A new instrument for stereotaxic brain tumour biopsy. Technical note / E.O. Backlund // *Acta Chir. Scand.* – 1971. – № 137. – P. 825–832.
5. Boecher-Schwarz, H., Stereotactically Guided Cavernous Malformation Surgery / H. Boecher-Schwarz [et al.] // *Minimally Invasive Neurosurgery.* – 1996. – Vol. 39, № 2. – P. 50–55.
6. Chen, C.J. Stereotactic Radiosurgery for Unruptured Versus Ruptured Pediatric Brain Arteriovenous Malformations / C.J. Chen [et al.] // *Stroke.* – 2019. – № 7. – P. 745–751.
7. Conway, L.W. Stereotaxic diagnosis and treatment of intracranial tumors including an initial experience with cryosurgery for pinealomas / L.W. Conway // *Journal of Neurosurgery.* – 1973. № 38 (4). – P. 453–460.
8. Couldwell, W.T. Initial experience related to the use of the Cosman-Roberts-Wells stereotactic instrument / W.T. Couldwell, M.L.J. Apuzzo // *Journal of Neurosurgery.* – 1990. – Vol. 72, № 1. – P. 145–148.
9. Dervin, J.E. A simple system for image directed stereotaxis / J. E. Dervin, J. Miles // *Br. J. Neurosurg.* – 1989. – № 3 (5). – P. 569–574.
10. Gildenberg, P.L. Spiegel and G.T. Wycis – The Early Years. Stereotactic and Functional Neurosurgery / J. Neurosurg. – 2001. № 77 (1–4). – P. 11–16.
11. Giller, C.A. The first formulation of image-based stereotactic principles: the forgotten work of Gaston Contremoulins / P. Mornet, J. Moreau // *J. Neurosurg.*, – 2017. – № 127 (6). – P. 1426–1435.
12. Goerss, S.A. Computed Tomographic Stereotactic Adaptation System / P.J. Kelly, B. Kall, G.J. Alker // *Neurosurgery.* – 1982. № 10 (3). – P. 375–379.
13. Heilbrun, M.P. [et al.] Preliminary experience with Brown-Roberts-Wells (BRW) computerized tomography stereotactic guidance system / M.P. Heilbrun [et al.] // *J. Neurosurg.* – 1983. – Vol. 59. – P. 217–229.
14. Horsley, V. The structure and function of the cerebellum examined by a new method / Horsley V., R.H. Clarke // *Brain.* – 1908. – № 31. – P. 45–124.
15. Kato, A. Computer assisted neurosurgery: development of a frameless and armless navigation system (CNS navigator) / A. Kato [et al.] // *No Shinkei Geka.* – 1991. – № 19 (2). – P. 137–142.
16. Kelly, P.J., Evolution of contemporary instrumentation for computer-assisted stereotactic surgery / S.J. Goerss, B.A. Kall // *Surgical Neurology.* – 1988. – № 30 (3). – P. 204–215.
17. Kim, C.W. Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery / C.W. Kim [et al.] // *Spine J.* – 2008. – № 8 (4). – P. 584–590.
18. Leksell, L. A new technique for craniotomy; the osteodural flap / L. Leksell // *Acta Chir. Scand.* – 1949. – Vol. 98, № 3. – P. 270–283.
19. Maroon, J.C. Intracranial biopsy assisted by computerized tomography / J.C. Maroon [et al.] // *Journal of Neurosurgery.* – 1977. – № 46 (6). – P. 740–744.
20. Matzke, C. A comparison of two surgical approaches in functional neurosurgery: individualized versus conventional stereotactic frames / C. Matzke [et al.] // *Computer Aided Surgery.* – 2015. – № 20 (1). – P. 34–40.
21. Mussen, A.T. A cytoarchitectural atlas of the brain stem of the *Macacus rhesus* / A.T. Mussen // *J. Psychol. Neurobiol.* – 1922–1923. – Vol. 29. – P. 451–518.
22. Ohye, C. Prof. Hiro Narabayashi / C. Ohye, H. Fodstad // *Stereotactic and Functional Neurosurgery.* – 2001. – № 76 (3–4). – P. 125–128.
23. Ooba, H.F. Stereotactic Biopsy with Electrical Monitoring for Deep-Seated Brain Tumors / H.F. Ooba [et al.] // *World Neurosurgery.* – 2013. – № 79 (1). – P. 207.
24. Picard, C. The first human stereotaxic apparatus. The contribution of Aubrey Mussen to the field of stereotaxis / C. Picard, A. Olivier, G. Bertrand // *J. Neurosurg.* – 1983. – № 54. – P. 36–67.
25. Reinhardt, H.F. Computer assisted brain surgery for small lesions in the central sensorimotor region / H. F. Reinhardt [et al.] // *Acta Neurochirurgica.* – 1996. – № 138 (2). – P. 200–205.
26. Reinhardt, H.F. Interactive Sonar-Operated Device for Stereotactic and Open Surgery / H.F. Reinhardt, H.J. Zweifel // *Stereotact Funct Neurosurg.* – 1990. – № 54–55. – P. 393–397.
27. Riechert, T.L. Combined Stereotaxic Operation for Treatment of Deep-Seated Angiomas and Aneurysms / T. Riechert, F. Munding // *Journal of Neurosurgery.* – 1964. – № 21 (5). – P. 358–363.

28. Roberts, T.S. Technical and clinical aspects of CT-directed stereotaxis / T.S. Roberts, R. Brown. – Appl. Neurophysiol. – 1980. – № 43 (3–5). – P. 170–171.
29. Schulder, M. Handbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery / C.D. Gandhi // New Jersey Medical School, U.S.A. Associate editor, Mt. Sinai School of Medicine, New York, U.S.A. – 2002. – P. 345–352.
30. Stranjalis, G.R. Stereotactic Biopsy in the Era of Advanced Neuroimaging. Does the Minimal Therapeutic Gain Justify its Current Wide Use? / G.R. Stranjalis [et al.] // Minimally Invasive Neurosurgery. – 2003. № 46 (2) – P. 90–93.
31. Wycis, H.T. Principles and applications of stereo encefalotomia / E.A. Spigel // Cir Cir. – 1958. – Vol. 26. – P. 1–31.
-

I.M. Samochvalov, V.I. Badalov, K.E. Korostelev, M.I. Spitsyn, K.V. Tiulikov, P.Yu. Shevelev, E.G. Antonov

Neuronavigation as the evolution of stereotaxis

Abstract. *Modern stereotactic neurosurgery is a science that uses a high-tech technique of precise impact on deep structures and deeply located pathological formations of the brain. Depending on the disease, the impact on these structures and the pathological focus can be variable. Functional neurosurgery uses stereotactic technique for diathermodestruction and implantation of electrodes for chronic stimulation of cerebral nuclei in Parkinson's disease, certain forms of muscular dystonia, postherpetic trigeminal neuralgia, and a number of pain syndromes. In neurooncology, the stereotactic technique has found application as a minimally invasive technique for taking biopsies to determine further treatment tactics and for installing radioactive intrastates in brachytherapy of brain tumors. Non-functional stereotaxy (neuronavigation) is used in surgery for operations on tubular bones, with injuries to the spine, throat, ear, nose, penetrating wounds, which can significantly reduce intraoperative radiation exposure, intraoperative injuries, blood loss, surgical intervention time and thereby reduce the time of rehabilitation of victims and financial costs. The results of its use demonstrate superiority over traditional methods. Applications for intraoperative navigation with visual control have expanded in spine surgery – arthrodesis, revision procedures, deformities with distorted anatomy, as well as use in intradural tumors, intracerebral hematomas. In addition, these technologies can, with minimal invasive surgery, mitigate most of the radiation exposure to the patient, surgeon, and operating room support staff.*

Key words: *stereotactic neurosurger, functional neurosurgery, dysfunctional stereotaxis, coordinate systems, stereotactic atlases, biopsy, neuronavigation, neoplasms, pointing, orientation, imagevisualization.*

Контактный телефон: 8 (812) 292-47-47; e-mail: vmeda-nio@mil.ru