

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СТЕРЕОТАКТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ.

Главы 1–3

В.В. Костюченко
Центр “Гамма-нож”, Москва

Предисловие

Стереотактическое облучение (СО) – направление лучевой терапии (ЛТ), стремительно развивающееся в мире за последние 30 лет. В России распространение современной техники для СО началось 10 лет назад с открытия отделения радиологии и радиохирургии в НИИ нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко и одновременным открытием на базе этого отделения коммерческого центра “Гамма-Нож” (ОАО “Деловой Центр Нейрохирургии”). Отделение было укомплектовано двумя стереотактическими аппаратами, линейными ускорителями Novalis производства фирмы BrainLAB и Primus производства фирмы Siemens. Несколько лет спустя там был установлен аппарат CyberKnife (КН – Кибер-Нож) фирмы Accuray, США. Центр “Гамма-Нож” (ГН), начал работу с установкой ГН Лекселла модели С производства Elekta (Швеция), заменённого в 2011 г. на модель Perfexion – PFX. В настоящее время количество аппаратов, позволяющих проводить СО, в стране составляет несколько десятков. Вместе с тем смысл стереотактического метода, его возможности и области применения известен и понятен далеко не всем специалистам, задействованным в лучевой терапии и онкологии. Причиной этому является, в частности, отсутствие материалов на русском языке об истории развития методов СО.

В предлагаемом обзоре сделана попытка представить недостающую информацию на основе данных из обзоров Гильденберга и Крауса, посвящённых истории стереотактической нейрохирургии [1], и истории стереотактической разрушающей лучевой терапии до 2011 г.

Солберга, Сиддона и Кавана [2], лекций Джереми Ганца, посвящённых истории ГН [3], а в наиболее современной части, вплоть до 2015 г., на материалах, предоставленных производителями оборудования и некоторых других источниках. Рассмотрены основные и наиболее принципиальные моменты СО, такие как принцип стереотаксиса, фиксация с помощью рамы, стереофотограмметрическая локализация, аппараты “Гамма-Нож”, “Кибер-Нож”, “Новалис”, адаптация линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) с использованием многолепестковых коллиматоров (МЛК) и микро-МЛК (мМЛК), технологии VMAT и FFF. В заключительной части обсуждаются перспективы развития СО, а также проблемы, затрудняющие их широкое использование. Сделана также попытка ввести и уточнить русскоязычную терминологию и аббревиатуры, соответствующие английским терминам. В каждом случае указаны и английские варианты. Кроме того в ряде случаев приведена транскрипция названий устройств, фирм и фамилий специалистов, с которыми приходится часто сталкиваться в данной области.

1. Введение

Стереотактическое облучение и наиболее часто используемое его направление – стереотактическая разрушающая ЛТ (stereotactic ablative radiotherapy), начавшиеся со стереотактической радиохирургии (СРХ) (stereotactic radiosurgery – SRS), и позже распространившиеся на внечерепные (экстракраниальные) патологические очаги, что часто обозначают как СЛТ тела человека (СЛТТ), (stereotactic body

radiation therapy – SBRT), имеют глубокие, более чем столетние корни одновременно в двух дисциплинах: в хирургии и в терапевтической радиологии. С момента изобретения в 1951 г. СРХ хорошо изучена благодаря всестороннему сотрудничеству физиков, радиационных онкологов и нейрохирургов. СРХ превратилась в важный элемент в лечении метастазов в головной мозг, церебральных сосудистых мальформаций, тригеминальной невралгии и некоторых первичных опухолей мозга и функциональных патологий. Современная СРХ внутричерепных мишеней может быть проведена неинвазивно, но с высокой степенью точности и в амбулаторном режиме. Новые подходы в определении положения опухоли (tumor targeting), навигации по изображениям (image guidance) и благодаря технологиям повторного позиционирования пациента (patient repositioning) позволили распространить СРХ на проведение деструкции вне центральной нервной системы, включая опухоли, расположенные вблизи позвоночника. Навигация по изображениям сейчас играет очень важную роль при применении СО. Результаты лечения опухолей таких локализаций, как лёгкие, печень и позвоночник подталкивают к сдвигу парадигмы в области радиационной онкологии в сторону подведения высоких доз за одну фракцию.

2. Первый опыт лучевой терапии

Хорошо известно, что открытие ионизирующего излучения сделал В.К. Рентген в конце 1895 г., и это было излучение, исходящее из катодной трубки. Важно отметить, что хотя этот случай предоставил окончательные доказательства существования “х-лучей”, почти наверняка это был не первый случай, когда они были сгенерированы, так как такие исследователи как Плукер (Plucker), Крукс (Crookes) и Ленард (Lenard) экспериментировали с катодной трубкой с середины XIX века. А.Беккерель, побуждаемый в значительной степени связью невидимых “х-лучей” с флюоресценцией, продолжил работу Рентгена, что привело к открытию в январе 1896 г. материалов с естественной радиоактивностью. В.К. Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике в 1901 г., а А. Беккерель и Мари и Пьер Кюри (Marie and Pierre Curie) заслужили её в 1903 г. [2].

Первое терапевтическое применение рентгеновского излучения было осуществлено 29 января 1896 г., всего через несколько недель после сообщения Рентгена [4]. Любопытно, что по всей видимости терапевтическое применение х-лучей опередило их применение в диагностических целях. Первое диагностическое применение было осуществлено 28 февраля 1896 г., когда при подготовке к хирургической операции врачи попытались получить изображение головы ребёнка, пострадавшего от случайного ружейного выстрела [5]. Интроскопическая процедура желаемых данных не предоставила, но привела к важному наблюдению: через 3 недели ребёнок полностью потерял волосы на поверхности, соответствующей облучённой области.

Ранняя история терапевтического применения х-лучей чрезвычайно разнообразна и наполнена множеством анекдотичных событий. Общепринятыми были такие показания как экзема, псориаз, угри, стригущий лишай, капиллярная гемангиома, гипертериоз [6]. Также эффективно лечились поверхностные злокачественные патологии. Основным достижением в “терапевтической радиологии” стало изобретение в 1913 г. Кулиджем (William Coolidge) высоковакуумной рентгеновской трубки. За 10 лет напряжение на трубке превысило 200 кВ, что позволило в последующие десятилетия проводить терапию не только поверхностных, но и более глубоко залегающих опухолей. В те ранние годы недостаточная глубина проникновения рентгеновского излучения с низкой энергией была хорошо известным ограничивающим фактором. Для его преодоления разрабатывались различные способы подведения многих пучков. Были созданы методики “концентрических конусов” (concentric cone) [7] и [8], маятниковая техника Тешендорфа [9] (рис. 1) и спиральная техника Бишофа [10, 11]. Аппарат Бишофа впоследствии изготавливался фирмой Siemens Reiniger Werke (Erlangen, Германия) (рис. 2). Такой аппарат под названием “Стабилипан” работал и в России в 1960-ые годы. Этот подход заложил основы СРХ, а именно дозиметрическую компактность, которая обеспечивалась наведением на мишень многих пересекающихся, но не перекрывающихся пучков.

В первых клинических экспериментах главной идеей было то, что “...терапевтическая доза должна быть подведена с наибольшей интенсивностью, в кратчайшее время...” [12]. Од-

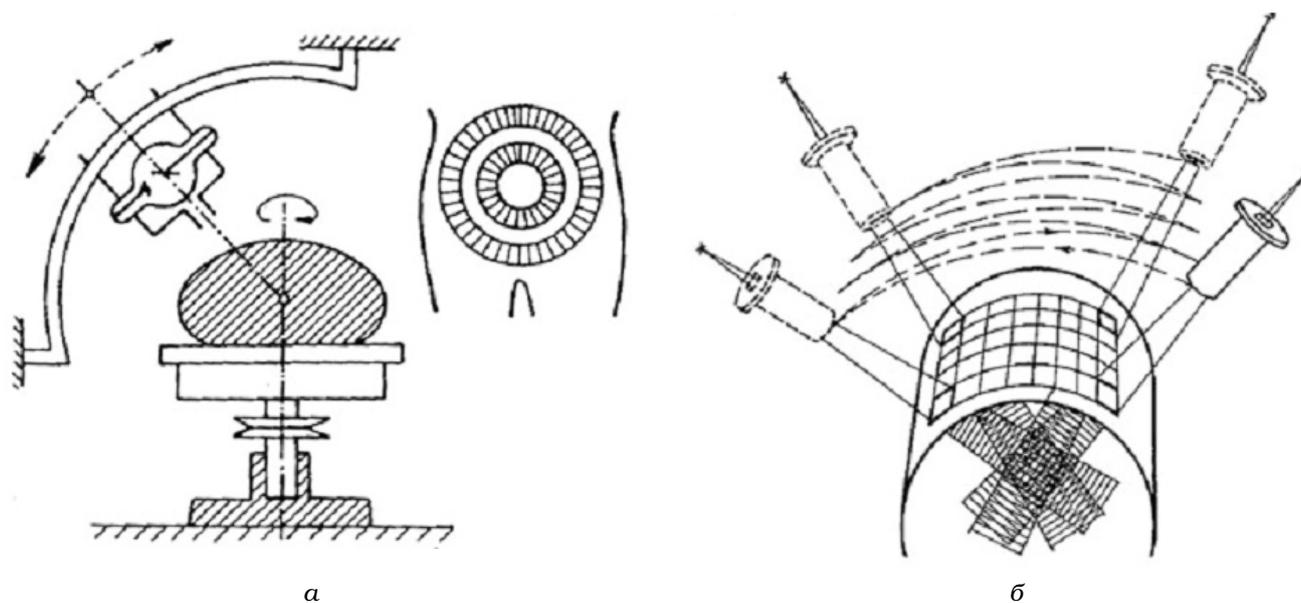


Рис. 1. Первые рентгеновские аппараты с пересекающимися в одной точке пучками, сконструированные для компенсации плохих характеристик глубинного дозового распределения, свойственного киловольтному излучению: а) Метод концентрических конусов, предложенный Колем и Хеншке (Kohl and Henschke); б) матриксовый подход Тешендорфа (Teschendorf)

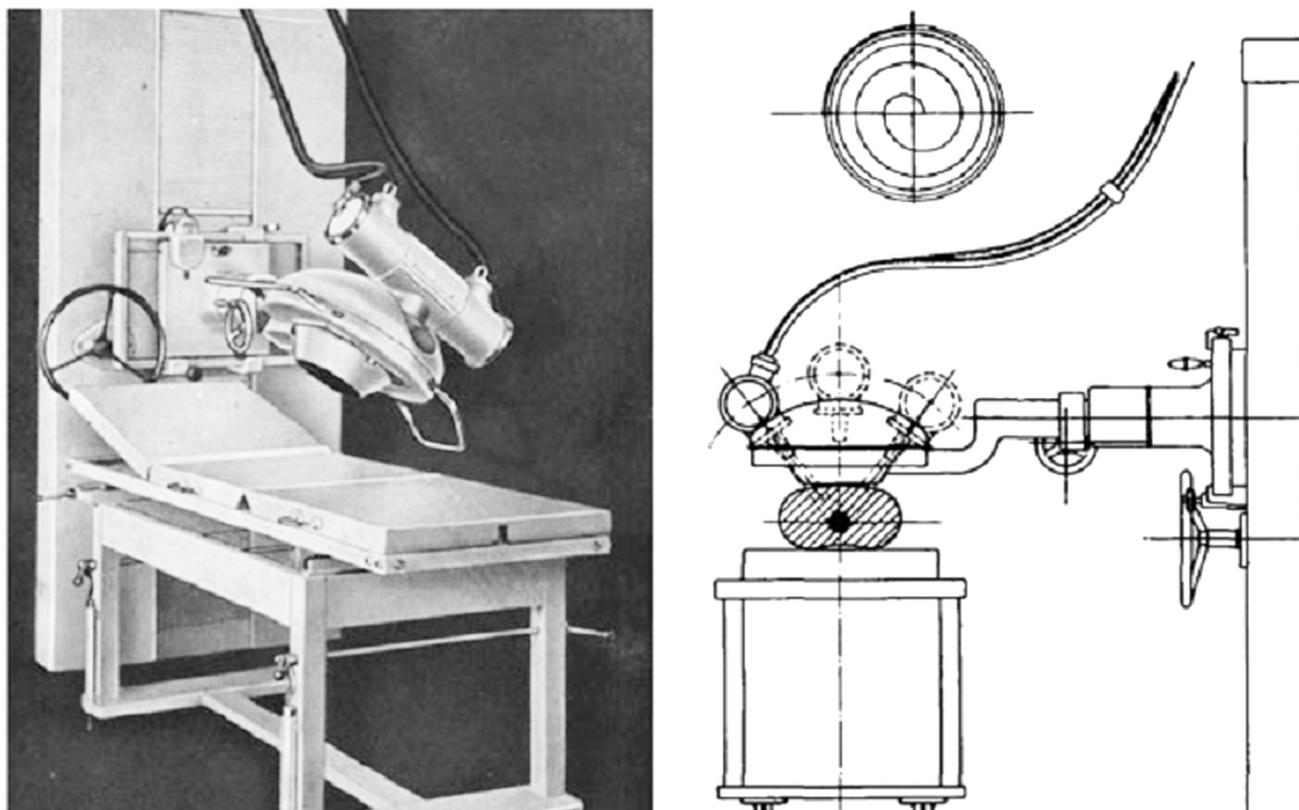


Рис. 2. Спиральная техника Бишофа (Bischoff) – “Стабилипан” фирмы Siemens

нако было хорошо известно, что “дозы, достаточно большие для уничтожения всех опухолевых клеток, не могут быть безопасно подведены к достаточно большой неповерхностной области” [13]. Поэтому на протяжении первых трёх десятилетий XX века применение ионизирующего излучения в онкологии имело ограниченный успех. В эту эпоху мало что было известно о зависимости отклика клеток и тканей от таких радиологических параметров, как время, доза и мощность дозы.

Разработка фракционированного облучения, начавшееся в 20-ые годы, привело к наиболее глубоким изменениям. Введение фракционирования связано с именем Клавдиуса Рега (Claudius Regaud), профессора Института Пастера и директора радиобиологической лаборатории Института радия, переименованного позже в Институт Кюри в честь его основательницы и директора Мари Кюри. Наблюдая значительные отличия в биологических эффектах при медленном облучении, например источниками радия, Рега начал систематическое изучение влияния ионизирующего излучения на спермо-вырабатывающие клетки в яичках [14–16]. Результаты наблюдений вкратце звучали так: “Невозможно стерилизовать яички кролика посредством очень большой дозы рентгеновского излучения без возникновения радиационного дерматита. Но, в противоположность этому, легко стерилизовать данный орган без какого-либо повреждения кожи в том случае, если та же доза даётся за 5 фракций, растянутых на период от 5 до 10 дней” [16]. Рега продолжил наблюдения в клинике, заключив позже, что “применение данной биологической техники даёт возможность получать значительно больший процент излечений в случае рака кожи, шейки матки, языка, глотки, гортани, гайморовой пазухи и т.д., одновременно сохраняя целостность нормальных тканей со значительно большей эффективностью, чем было возможно ранее” [16]. В дальнейшем принципы фракционирования были адаптированы и широко распространены в клинической практике Анри Кутаром (Henri Coutard) [17–19]. По сей день лучевая терапия остаётся обязанной своим существованием этим пионерским работам, включая Рега, Кутара и др. Однако, даже если исключить реоксигенацию опухолей, фракционированное подведение дозы не оптимально для излечения многих опухолей. Возможность безопасно подводить разрушающую (абляционную) дозу, продемонстрированная ис-

ходно с помощью стереотактической методики, может значительно улучшить эффективность ЛТ.

3. История развития стереотактической хирургии

Параллельно с развитием терапевтического использования радиации происходило зарождение и развитие техники стереотаксиса от начальной идеи и испытания на животных до использования в клинике. Оба направления стартовали в начале XX века и оба прошли через этап развития, приведший к успешному широкому применению в клинике, начавшемуся в середине XX века. Так как обсуждаемое нами СО является соединением этих двух направлений, то придётся сделать отступление от истории использования радиации и заняться историей нейрохирургии, подробно освещённой в обзоре [1].

3.1. Стереотактический метод Хорсли и Кларка

Исходно стереотаксисом был назван метод задания точки в мозге с использованием внешней трёхмерной (3D) референсной рамы с целью проведения неврологической процедуры с минимальной инвазивностью. Хорошо известно, что стереотактический метод является детищем Роберта Кларка (Robert Clarke), инженера, физиолога и хирурга, который вместе с нейрохирургом и нейрофизиологом сэром Виктором Хорсли (Victor Horsley), привлёкшим его к участию в конструировании аппарата, изобрёл устройство, позволявшее вводить зонды, лезвия или иглы точно в субкортикальные структуры обезьян и других экспериментальных животных. Конструкцию и способ применения инструмента в основном разработал Кларк, а тонкости использования – Хорсли [20]. Концепция стереотаксиса была высказана Кларком и Хорсли в 1895 г., оригинальное устройство сконструировано в 1905 г. и впервые использовано в 1906 г. [21–23].

Определяющая работа, с которой “стереотаксическая” хирургия берёт своё начало, была опубликована в 1908 г. [24]. Хорсли и Кларк использовали декартову систему координат, позволившую задавать точку в пространстве, указывая три координаты: передне-заднюю (AP – anterior-posterior), поперечную (lateral) и вертикальную, и с тех пор эта декартова система

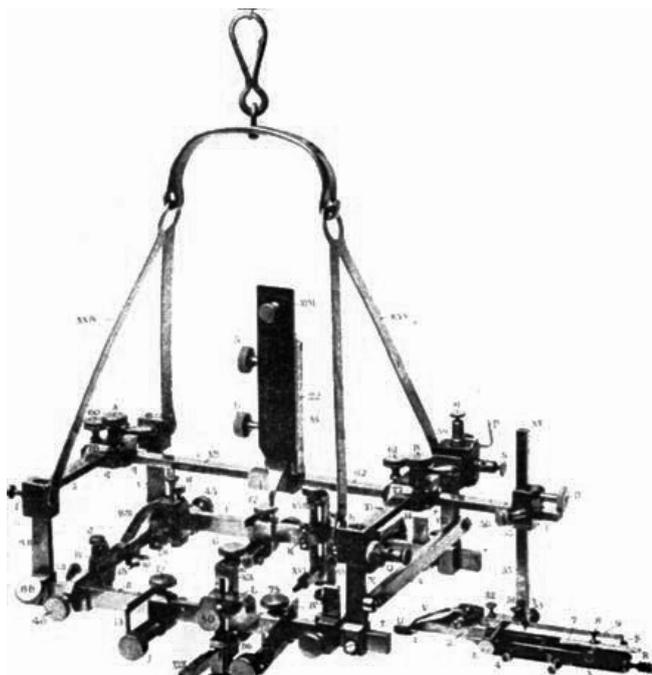


Рис. 3. Оригинальный аппарат Хорсли-Кларка (Horsley-Clarke) [24]

остаётся отличительным признаком стереотактических систем. В эксперименте, осуществлённом с помощью данного аппарата, проводились электролитические разрушения в зубчатых ядрах мозжечка обезьяны с целью изучения их структуры и функционирования [24] (рис. 3).

Оригинальное устройство, изготовленное Свифтом и Соном (Swift и Son), в настоящее время хранится в Музее науки в Лондоне. Были созданы две копии рамы Кларка. Один экземпляр, привезённый в США нейрохирургом Эрнестом Саксом (Ernest Sachs), находится в отделении нейрохирургии Университета Калифорнии в Лос-Анжелесе (UCLA) [2].

Статья 1908 г. о стереотаксической хирургии является великолепным примером статьи для научного журнала, оригинальный вариант которой необходимо прочитать каждому, кто интересуется историей медицины. Статья разделена на четыре части. В первой части описан первый аппарат для животных, бывший прототипом всех подобных устройств, предназначенных как для животных, так и для людей, на протяжении всего прошедшего столетия (рис. 3). Для задания положения мишени использовалась декартова система координат, т.е. положение точки в пространстве определялось относительно трёх плоскостей,

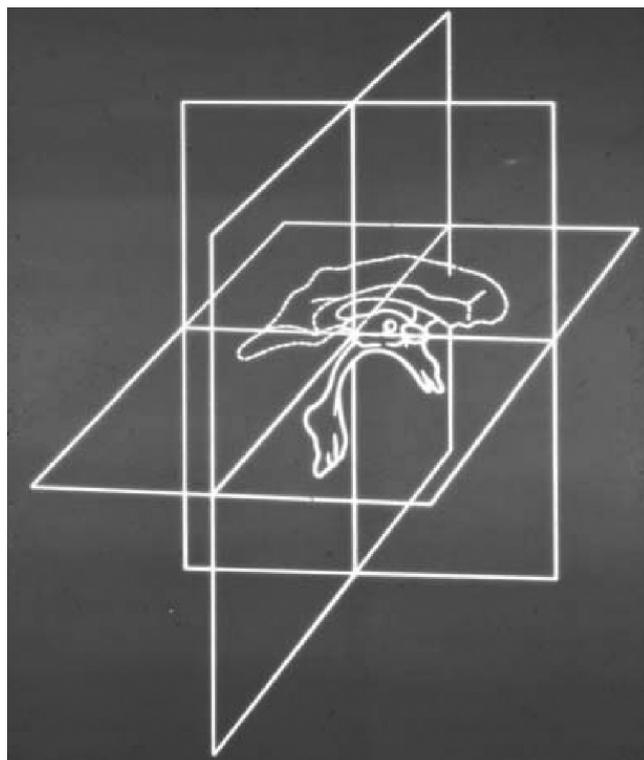


Рис. 4. Концепция декартовых плоскостей, выровненных по третьему желудочку, для измерения координат [1]

пересекающихся в одной точке. Каждая плоскость расположена под прямым углом к двум другим, как показано на рис. 4. Положение задаётся тремя координатами, каждая из которых указывает положение по отношению к одной из трёх плоскостей: x – вперёд или назад от коронарной (сagonal, фронтальной) плоскости, y – латерально (вбок, в сторону) относительно срединно-сагиттальной плоскости и z – выше или ниже горизонтальной плоскости. Чтобы координаты соответствовали структурам мозга животных, три плоскости должны быть сопоставлены, или точно выровнены относительно головы экспериментального животного. Это достигалось тем, что плоскости соответствовали частям устройства, неподвижно удерживавшего голову. Горизонтальная плоскость (аналогичная плоскости Франкфорта, используемой в антропологии), от которой определялась вертикальная координата, проходила через две ушные вставки и выступ (tab), опирающийся на нижний край левой глазницы (или обеих глазниц, при отсутствии асимметрии). Срединно-сагиттальная плоскость [25] проходила через

точку посередине между ушными вставками под прямым углом к горизонтальной плоскости и задавала левую или правую латеральные координаты. Корональная плоскость [26] проходила между ушными вставками, перпендикулярно двум другим плоскостям, задавая АР-координаты. Во второй части статьи описана техника привязки стереотаксического атласа к той же декартовой системе так, чтобы было возможно определение координат конкретных структур мозга. Третья часть представляла собой великолепный трактат, посвященный проведению электролитического повреждения органа постоянным током. Четвертая часть описывала собственно эксперимент.

3.2. Аппарат Мюссена

Кларк обратил внимание Хорсли на то, что разработанный метод и прибор могут быть полезны и для людей, и даже запатентовал идею стереотаксического аппарата для человека, также основанного на костных ориентирах, по которым определялись декартовы координаты [27, 28]. Однако сотрудничество этих учёных прекратилось из-за разногласий, не связанных с данной темой. Кларк вместе с другими коллегами занялся публикацией функциональных атласов приматов и кошек [22]. Таким образом, никто не продолжил развивать идею создания стереотаксического аппарата для людей [29]. Правда, в 1911 г. Обри Мюссен (Aubrey Mussen), инженер, участвовавший в создании аппарата Хорсли-Кларка, разработал собственное устройство для использования у человека (рис. 5) [30]. Свидетельств о том, что

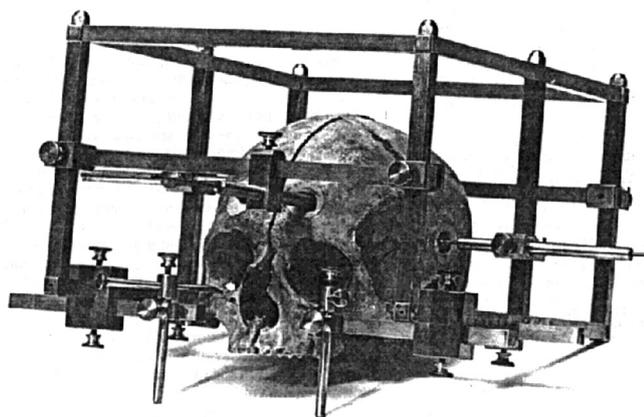


Рис. 5. Рама Мюссена – первое стереотаксическое устройство, предназначенное для человека. Факт использования не известен

он предлагал кому-то из коллег-нейрохирургов использовать его, не сохранилось. В конечном счёте, он завернул его в газету и спрятал в коробке на чердаке. Его семья обнаружила аппарат 60 лет спустя после изготовления, определив время изготовления по дате на газете, в которую он был завернут. Возможно то, что рама Мюссена не была использована, было к лучшему, т.к. позже стало понятно, что соотношение между костными ориентирами на черепе человека и структурами мозга имеют столь большое разнообразие, что определить точное положение мишени таким образом невозможно. Прошло почти 40 лет с выхода статьи 1908 г. до момента, когда понимание физиологии мозга человека достигло такого уровня, что позволило определять соответствующие внутримозговые подкорковые мишени.

3.3. Предшественники стереотаксиса

Существуют статьи, описывающие разнообразные устройства для направления зонда в головном или спинном мозге, существовавшие до 1908 г., претендующие на то, что они являются “первыми” стеротаксическими устройствами. Но ни в одном устройстве не была использована декартова система координат. Большинство использовало внешние ориентиры для аппроксимации положения различных структур. Возможно первой из подобных систем была система Диттмара (Dittmar) [31], в которой он использовал направляемый зонд для того, чтобы ввести лезвие в продолговатый мозг крысы.

Из отечественных ученых в качестве предшественников стереотаксической хирургии человека можно упомянуть Д.Н. Зернова [32], который в 1889 г. описал “энцефалометр”, позволявший локализовать области коры головного мозга, и Н.В. Алтухова [33], использовавшего прибор в клинике двумя годами позднее. Однако “энцефалометр” не использовал декартовых координат и не предназначался для локализации глубоких подкорковых структур.

3.4. О терминах “стереотаксический” или “стереотактический”

В отношении написания названия описываемой технологии существует противоречие между отечественной научной литературой, где принято написание “стереотаксический” (от слова “stereotaxis”) и зарубежной, где принято написание “стереотактический” (от

слова “stereotactic”). Хорсли и Кларк назвали свой метод “стереотаксическим” от греческих слов “stereos” – трехмерный и “taxis” – порядок, взаиморасположение, в том смысле, как используется в слове “таксономия”. По мере развития СХ человека, некоторые авторы, в основном в Европе, использовали написание через букву “t”. На конференции Международного общества исследований в стереоэнцефалотомии (International Society for Research in Stereotaxotomy), в названии которого шла речь о трёхмерных исследованиях головного мозга или иначе энцефалона, в 1973 г. название общества решено было изменить. В результате возникла необходимость прийти к соглашению относительно написания этого термина. Было проведено голосование по поводу того, какое написание использовать в новом названии общества: “стереотаксическое” (“трехмерное” (stereo) и “расположение, порядок” – оба из греческого языка), или “стереотактическое” (смешанное слово, обозначающее “трехмерное” из греческого, и “прикасаться” (to touch) от латинского “tactus”). Хирурги решили, что целью их работы является скорее прикосновение к желаемым структурам – зондом или электродом, и голосовали за букву “t”. Соответственно тогда все вновь возникающие общества было решено называть во-первых, “стереотактическими”, чтобы указать способ доступа к мишени, а во-вторых, “функциональными”, что подразумевало исследование функционирования мозга. Так возникли Всемирное, Американское и Европейское общества стереотактической и функциональной нейрохирургии [34]. До этого момента термин “стереотаксис” относился как к животным, так и к людям (что до сих пор сохранилось в отечественной литературе). Позже в западной литературе общепризнанным стало название хирургии человека “стереотактической”, а хирургии животных “стереотаксической”.

С точки зрения ЛТ, слово “прикосновение” кажется неуместным. Кроме того, не очень хорошо выглядит смешение слов из разных языков. В английском варианте это смешение не столь значимо, т.к. предполагается смешение греческого корня и родного английского (to touch), т.е. адаптация, хотя на самом деле имеет место смешение греческого и латинского корней. Соответственно использование в отечественной литературе исходного варианта терминов (стереотаксическая хирургия, РХ, ЛТ) не вызывает раздражения. Тем не менее, в настоя-

щей работе, поскольку в значительной части она опирается на переводы западных работ, мы везде использовали написание через букву “t”.

3.5. Рождение стереотактической хирургии человека: Шпигель и Уайцис

Поиск достаточно точных внутричерепных ориентиров, по которым можно определять положение тех или иных структур мозга и попытки создания устройства для введения электрода точно в выбранную анатомическую структуру, велся на протяжении 40 лет. Для контроля болевых ощущений делались попытки прерывания проводящих путей-трактов в мозге. Подобные методы включали хирургическое рассечение, как правило, поверхностных трактов и используются до сих пор [35–37]. К 40-м годам существовало хорошее понимание процесса первичного распространения боли, восходящей по стволу головного мозга. Также становилось хорошо разработанным понимание того, как лимбическая система участвует в восприятии боли [38–39]. В 1933 г. немецкий нейрохирург Мартин Киршнер (Martin Kirschner) разработал стереотактический аппарат, фиксирующийся на черепе человека, для лечения невралгии тройничного нерва (trigeminal neuralgia) [40]. Однако считается,

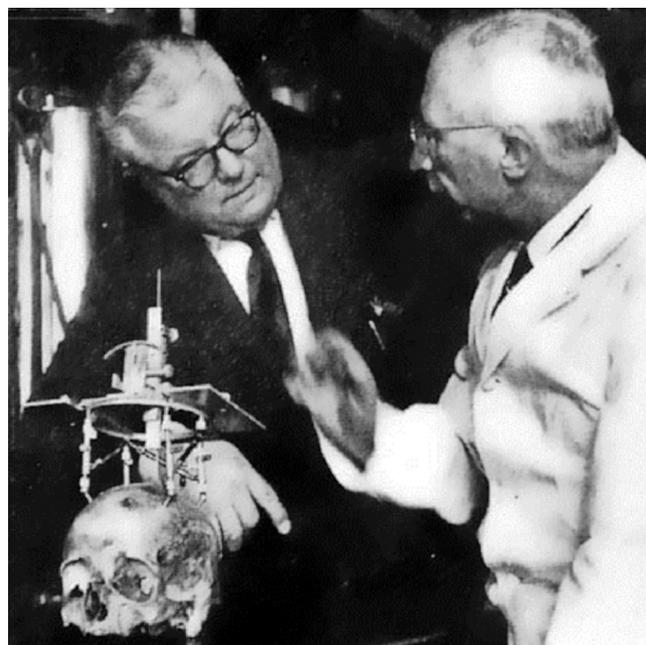


Рис. 6. Эрнест А. Шпигель (Ernest A. Spiegel) и Генри Уайцис (Henry T. Wycis) с моделью V своего стереотактического аппарата для применения на людях [44]

что первыми успешное внутричерепное применение СХ на людях выполнила команда Эрнеста Шпигеля (Ernest A. Spiegel) и Генри Уайциса (Henry T. Wycis) (рис. 6) [41].

Шпигель – невролог и нейрофизиолог, бежавший от нацистов из Вены, эмигрировал в США и был принят в Медицинскую школу Темпла в Филадельфии в качестве профессора экспериментальной неврологии [42]. Уайцис начал работать в лаборатории Шпигеля, будучи студентом медицины, прошёл резидентуру и был принят на работу [43]. В 1947 г. они сообщили о первом использовании разработанного ими стереотактического аппарата для человека.

Для внедрения СХ человека это было очень удачное время (рис. 7 и 8). До изобретения психотропных препаратов префронтальная лоботомия была весьма популярна и на-

значалась в большом числе случаев [46]. Одним из основных побуждений к разработке СХ было желание обеспечить контролируемый эффект, аналогичный эффекту лоботомии, но с меньшим риском неумышленного неврологического дефицита. Правда, когда стереотаксис стал доступен, первым стал пациент с двигательными расстройствами, а первые сообщения о психиатрии появились только через несколько лет.

Нейрофизиология к тому моменту достигла такого развития, что мишень могла выбираться на разумной основе. Росло понимание устройства экстрапирамидальной системы и становилось ясно, что многие двигательные расстройства затрагивают этот контур. Возможности хирургического подхода были продемонстрированы Мейерсом (Meyers) [47], представившим в 1942 г. результаты лечения 38 пациентов (рис. 9).

Одним из ключевых моментов в данной области стало появление рентгеновского оборудования с быстрым проявлением снимков в

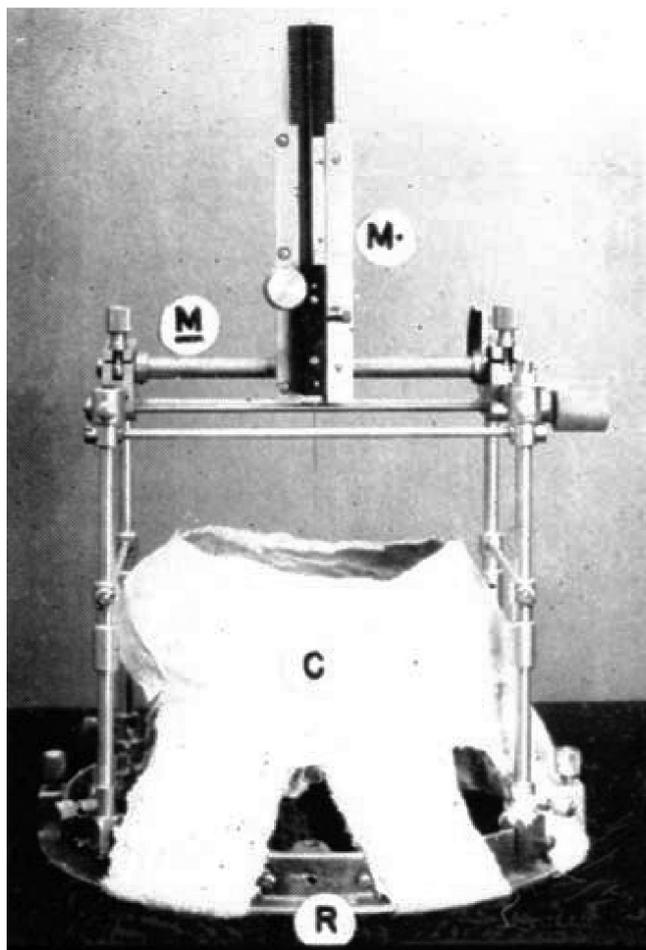


Рис. 7. Оригинальный аппарат Шпигеля и Уайциса [45]

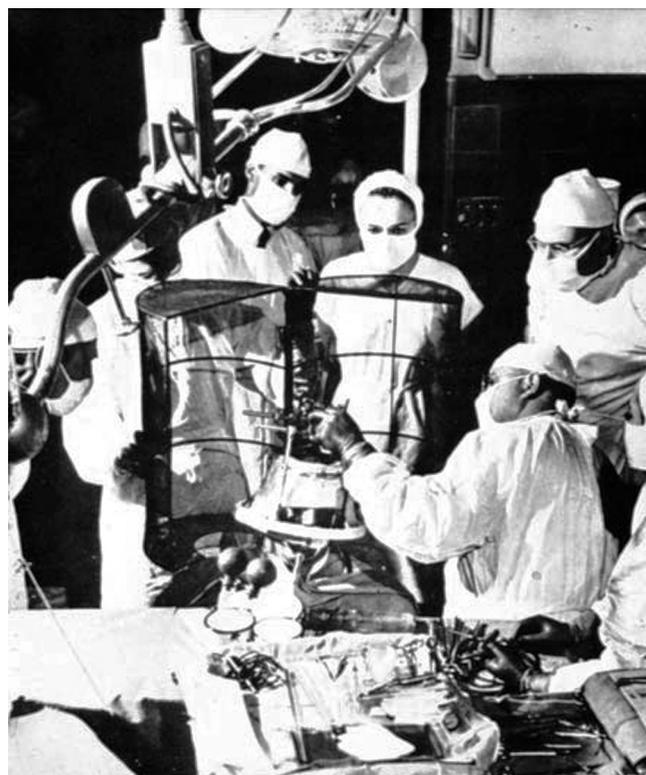


Рис. 8. Шпигель и Уайцис в операционной. На фотографии видна клетка Фарадея, экранирующая электромагнитные шумы и позволяющая вести запись потенциалов [1]

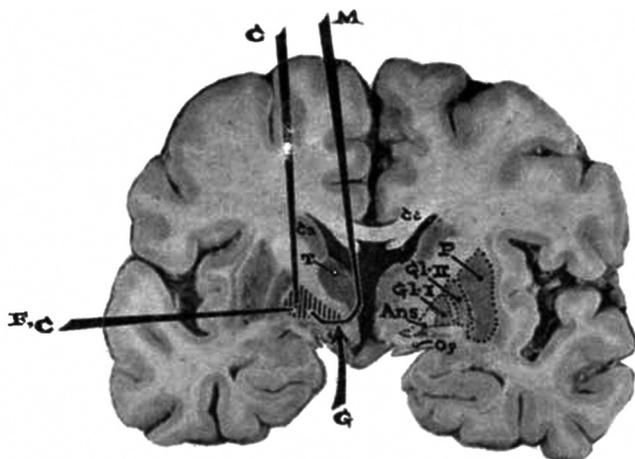


Рис. 9. Хирургия области базальных ядер с открытым доступом по Мейерсу (Meyers) [48]

операционной. Ключом к СХ человека стала идентификация внутримозговых ориентиров по рентгеновским снимкам мозга или по другим изображениям, и вычисление положения мишени по отношению к этим структурам. Рентгеновские вентрикулограммы можно было использовать для визуализации референсных структур вблизи третьего желудочка, относительно которых можно было рассчитывать положение любых внутримозговых структур [45]. Положение специфических структур требовало привязки к стереотактическому атласу человека, который был опубликован вскоре после представления стереоэнцефалотомии (“stereoenkephalotomy” [44]) – именно так назвали новый метод Шпигель и Уайцис [49].

Для измерений в мозге использовали декартову систему координат. Устройство по существу повторяло аппарат Хорсли–Кларка, который прикрепляли к голове пациента, закрепляя его на кольце, удерживаемом шапкой из пластыря, изготавливаемой индивидуально для каждого пациента. Рама и повязка были съёмными, что позволяло разделить процедуру получения изображений и собственно хирургию. Кольцо выравнивали в горизонтальной плоскости с помощью ушных вставок, так что рентгеновское исследование в передне-задней и поперечной проекциях можно было выполнить точно и воспроизводимо. Радиография с контрастом, вентрикулография и позже пневмоэнцефалография позволяли визуализировать внутричерепные опорные точки, относительно которых определяли положение интересующих структур и мишеней. Микропривод,

крепящийся на кольце, располагался над головой пациента, держал электрод и направлял его вертикально или наклонно во внутримозговую мишень. Исходно в качестве основных ориентиров использовали переднюю комиссуру и шишковидную железу, и на основании измерений между этими структурами и желаемой мишенью создавали атлас [49]. Использование межкомиссурной линии было введено десятилетие спустя Талайрахом (Talairach) и его сотрудниками, и с разными изменениями принято большинством нейрохирургов.

Исходной областью применения предполагалась психирургия «...с целью уменьшить эмоциональную реактивность посредством процедуры, значительно менее радикальной, чем лоботомия» [45]. Авторы предполагали также использовать систему при болевых синдромах (посредством повреждения спинального тракта и Гассерова узла, двигательных расстройств) посредством паллидотомии, т.е. разрушения части структуры в таламусе человека, который называют “бледным шаром” или паллидумом (globus pallidus) и вывода жидкости из кист [45]. Можно полагать, что авторы испробовали новый метод для всех этих патологий до выпуска первой публикации [1].

П.Л. Гильденберг вспоминает, что в 1956 г., когда он, будучи студентом-медиком, только начал работать со Шпигелем и Уайцисом [43, 51], рентгеновская визуализация опорных точек возле желудочка требовала пневмоэнцефалограммы [49, 50], что делало необходимым точно повторно устанавливать стереотактическое устройство. Аппарат устанавливали пациенту во вторник, выполняли пневмоэнцефалографию, проводили измерения, после чего аппарат снимали, так как пациент к тому времени слишком уставал, чтобы выдержать процедуру под местной анестезией. Пациента возвращали в операционную двумя днями позднее, кольцо повторно устанавливали на голову для проведения уже самого хирургического вмешательства. После того как стали доступны вещества, усиливающие контрастность рентгеновских снимков, возникла возможность проведения всех этапов, включая хирургию, за один сеанс [43].

Сперва повреждения создавали инъекциями спирта, которые теоретически должны были с большей вероятностью влиять на нейроны выбранных ядер, не затрагивая проводящие пути. Распространение спирта было непредсказуемым, однако очень скоро поврежде-

ние стало проводиться тем же электролитическим постоянным током, с которым Хорсли и Кларк экспериментировали почти за полвека до того [24]. Однако при этом возникал риск осуществления внезапной резкой стимуляции при изменении тока (обратите внимание на клетку Фарадея на рис. 8). Вскоре были разработаны другие методы, такие как инъекции масла с прокаинам (oil-procain) и воска (oil-procain-wax) [52, 53], инъекции спирта, иногда с использованием канюли с баллоном или с коагулирующими веществами [54, 55], механическое повреждение с помощью лейкотомы (хирургический инструмент для проведения лейкотомии (лоботомии) [56], а позже радиочастотный метод и метод криодеструкции.

Философия, исповедуемая с первых процедур Шпигеля–Уайциса и поддерживаемая в течение многих лет большинством врачей, состоит в том, что каждый раз, когда электроды проникают в мозг, они порождают уникальную возможность изучения нейрофизиологии человека. Таким образом, каждая процедура включала в себя как физиологическое подтверждение правильности положения электродов, так и нейрофизиологические исследования [57]. Это не только обеспечивало подтверждение правильности определения мишени, но и вело к большему пониманию устройства человеческого мозга и характеру его патологий.

Интерес к новой технике был огромен. Первое десятилетие после представления СХ было очень продуктивным. Нейрохирурги со всего света направлялись в Медицинскую школу Темпла, где изучали новый метод, и, возвращаясь домой, начинали работать в этой новой области. Каждому приходилось конструировать и изготавливать собственную стереотактическую раму, так как коммерчески доступных не существовало. В короткое время было представлено множество аппаратов, включая несколько улучшенных вариантов Шпигеля и Уайциса, которые большую часть своей работы выполнили с использованием модели V (Model V) (рис. 6).

На протяжении 1950-х было сконструировано, как минимум, 40 разных аппаратов и все они относились к трём основным типам. Система Шпигеля–Уайциса требовала настройки параллельным переносом, так же как в аппарате Хорсли–Кларка, в котором положение электрода изменялось смещением каретки спереди–назад и в поперечном направлении относительно базовой пластины для получения со-

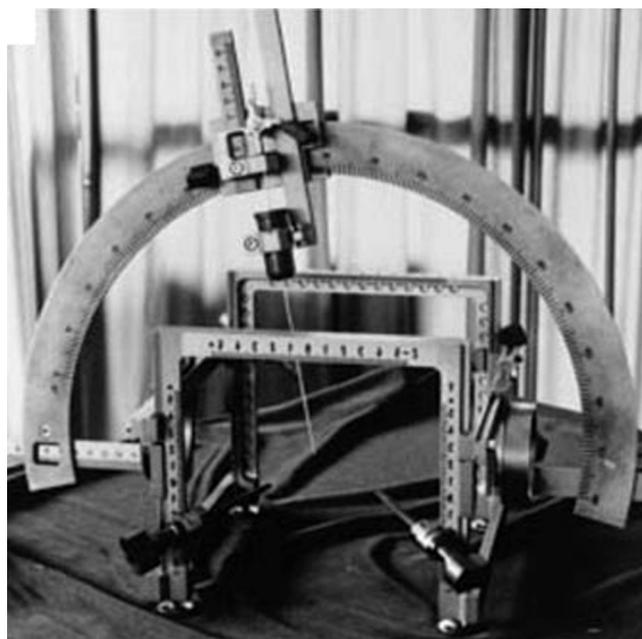


Рис. 10. Ранняя версия стереотактической системы Ларса Лекселла [2]

ответствующих координат; вертикальная настройка производилась системой с микроприводом, удерживающим электрод. Предопределённая траектория могла требовать двух отдельных угловых настроек.

Скоро последовали другие варианты [58]. Наиболее заметным стало устройство, разработанное в 1948 г. вернувшимся в Швецию из поездки в Филадельфию Ларсом Лекселлом (Lars Leksell) [59] (рис. 10). Три координаты задавали положение мишени и центр полукруглой арки, вдоль которой двигалась каретка с электродом, т.е. последний всегда указывал в изоцентр, где располагалась мишень. Это устройство обеспечивало максимальную гибкость в выборе точки входа электрода или канюли и их траектории, и соответственно было значительно проще в эксплуатации. Рама позже была модифицирована, но функционально осталась такой же, и всего два года спустя Лекселл использовал эту раму для наведения узкого пучка излучения на мишень [60]. После изобретения рентгеновской компьютерной томографии Лекселл столь же быстро построил устройство, совместимое с КТ [61].

Несколько позднее Талайрах [62] в Париже сконструировал систему, включающую введение электродов через фиксированную сетку, что позволило изучать мозговое кровообращение. Рама Талайраха знаменательна тем, что

была использована для первой радиохирургической процедуры, выполненной с помощью линейного ускорителя [63].

В Германии Рихерт (Riechert) и Вольф (Wolff) [64] представили в 1951 г. свой вариант на основе параллельного переноса, включающий первую систему механической верификации настроек на основе фантома. В том же 1951 г. Бэйли (Bailey) и Стейн (Stein) [65] представили аппарат для сверления трепанационных отверстий. По существу это было направляющее устройство с шаровым соединением. Электрод выравнивался вдоль назначенной траектории, начерченной на снимках в АР и поперечной проекциях, что давало уточнение угла наведения на мишень. Параллакс корректировали повторной настройкой по повторным снимкам по мере продвижения электрода методом последовательных приближений.

С исторической точки зрения, следует отметить систему, разработанную Нарабаяши (Narabayashi) в Японии в 1951 г. [66, 67]. Его имя было вырезано из западной литературы в конце второй мировой войны, но он независимо разработал аналогичное устройство [68]. Обнаружив позже, что его система не уникальна, он признал приоритет Шпигеля и Уайциса.

В первое десятилетие после рождения СХ по всему миру открылось большое число центров. Лекселл в Швеции [59], Талайрах [69] и Гиё (Guiot) [70] во Франции, Рихерт и Мундингер (Mundinger) [71] в Германии. Среди других Гиллингхэм (Gillingham) [72] в Великобритании, Лайтинен (Laitinen) и Тойвакка (Toivakka) в Финляндии, Росси (Rossi) в Италии [73], Бертран (Bertrand) в Канаде [74], Веласко Суарез (Velasco Suarez) и Эскобедо (Escobedo) в Мехико [75], Обрадор (Obrador) в Испании [46], Бехтерева [76] и Кандель [77] в России. Каждый исследователь, в свою очередь, совершенствовал технику операции и определял новые показания, вследствие чего область быстро развивалась [78, 79]. Число стереотактических процедур, проведённых по всем миру за 1965 г., оценивается более чем в 25 тыс. [80], а в 1969 г. было пролечено 37 тыс. пациентов [81].

Необходимость в общении привела к рождению профессиональных сообществ. Первая встреча Международного общества исследований в стереоэнцефалотомии прошло в Филадельфии в 1966 г. через 20 лет после проведения первой стереотактической процедуры у человека. Основной её темой был стереотактический инструментарий, так как существо-

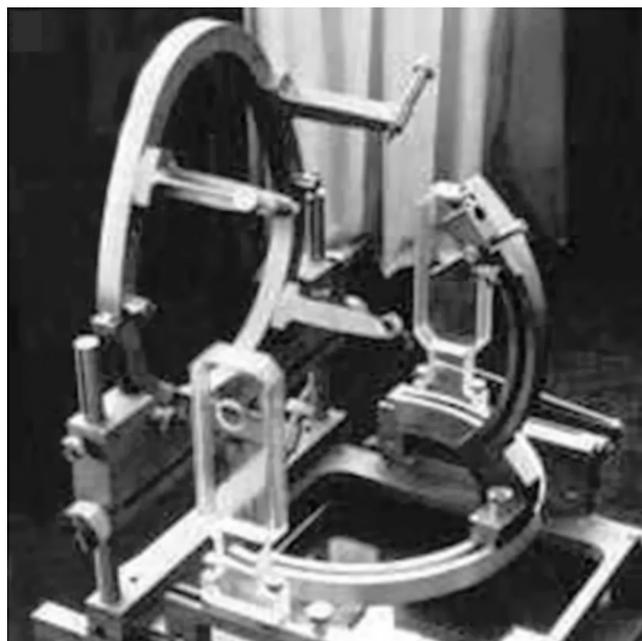


Рис. 11. Ранняя версия стереотактической рамы Тодда-Уэллса (Todd-Wells) [2]

вало всего несколько коммерчески доступных устройств. Каждому предлагалось привезти свой аппарат, или, как минимум, его переносную часть. Демонстрировалось более 40 систем. Второе собрание состоялось в Атлантик Сити в следующем году и акцентировало свое внимание на растущем числе показаний к СХ.

На протяжении 1960-х наиболее популярным устройством в США стал аппарат Тодда-Уэллса (Todd-Wells) (рис. 11), а в Европе – системы Лекселла и Рихерта-Мундингера (Riechert-Mundinger) [82, 83]. Координатная система Брауна-Робертса-Уэллса (BRW: Brown-Roberts-Wells) является основой современных рам, производимых фирмами Integra Radionics (Burlington, США) и BrainLAB (Германия). На протяжении следующих десятилетий устройства подверглись лишь небольшим усовершенствованиям, а акценты сместились на показания и результаты.

Существует четыре области, в которых нашлось место стереотактической функциональной нейрохирургии, и все четыре были созданы в первое десятилетие после представления СХ: двигательные расстройства, боль, эпилепсия и психические расстройства. Исторически СХ была разработана как более совершенный метод для проведения психохирургии с уменьшением грубейшей неопределённости и

осложнений, свойственных префронтальной лоботомии. Очень быстро было апробировано лечение болей, а вот первые попытки лечения эпилепсии были менее успешны, и данная область приобрела свою важность несколько позже, после того как были введены методы визуализации и инвазивного мониторинга. Кроме того, в части нейрохирургии, не связанной с функциональными патологиями, стереотаксис используется в основном для опорожнения кист и проведения биопсии.

Список литературы

- Gildenberg P.L., Krauss J.K. History of stereotactic surgery. // In: Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery. Lozano A.M., Gildenberg P.L., Tasker R.R. (eds). Springer Berlin Heidelberg. 2009, P. 1–33.
- Solberg T.D., Siddon R.L., Kavanagh B.D. Historical development of stereotactic ablative radiotherapy. // In: Stereotactic Body Radiation Therapy. Lo S.S., Teh B.S., Lu J.J., Schefter T.E. (eds). – Springer, Berlin Heidelberg. 2012, P. 9–35.
- Ganz J.C. History of the gamma knife. Elsevier Science Ltd, 2014.
- Grubbe E.M. Priority in the therapeutic use of X-rays. // Radiology, 1933, **21**, P. 156–162.
- Daniel J. The X-rays. // Science, 1896, **67**, No. 3, P. 562–563.
- Tyler A.F. Roentgenotherapy. – St. Louis, 1918.
- Kohl U. Stellvorrichtung fuer Roentgenroehren. // DRP, 1906, **192**, P. 571.
- Henschke U. Ueber rotations Bestrahlung. // Fortschr. Geb. Rontgenstr., 1938, **58**, P. 456.
- Teschendorf W. A simplified method of radiotherapy with a movable tube; rotational or pendular technic. // Strahlenther., 1953, **90**, No. 4, P. 536–545.
- Bischoff K. Der konvergenstrahler, eine Roentgenstrahlenquelle mit extrem hohen prozentualen Tiefendosen. // Strahlenther., 1950, **81**, P. 365.
- Bischoff K. Modern apparatus for cineroentgenography. // Fortschr. Geb. Rontgenstr., 1952, **76** (Suppl), P. 58–59.
- Matoni H.H. Dependence of the strength of the biological reaction on the intensity of the roentgen rays of equal doses. // Strahlenther., 1924, **2**, P. 375.
- Garland L.H. Carcinoma of the larynx. // Calif. West Med., 1934, **41**, P. 289–295.
- Regaud C. Influence de la duree d'irradiation sur les effete determine's dans le testicule par le radium. // C. R. Soc. Biol., 1922, **86**, P. 787.
- Regaud C., Ferroux R. Discordance des effets de rayons X, d'une part dans le testicule, par le peau, d'autre part dans la fractionnement de la dose. // C. R. Soc. Biol., 1927, **97**, P. 431.
- Regaud C. Progress and limitation in the curative treatment of malignant neoplasms by radium. // Brit. J. Radiol., 1929, **22**, No. 2, P. 461–476.
- Coutard H. Roentgentherapy of epitheliomas of the tonsillar region, hypopharynx and larynx from 1920 to 1926. // Amer. J. Roentgenol., 1932, **28**, P. 313.
- Coutard H. The results methods of treatment of cancer by radiation. // Ann. Surg., 1937, **106**, No. 4, P. 584–598.
- Coutard H. Present conception of treatment of cancer of the larynx. // Radiology, 1940, **34**, P. 136–145.
- Pereira E.A., Green A.L., Nandi D., Aziz T.Z. Stereotactic neurosurgery in the United Kingdom: the hundred years from Horsley to Hariz. // Neurosurgery, 2008, **63**, No. 3, P. 594–606.
- Clarke R.H., Horsley V. On a method of investigating the deep ganglia and tracts of the central nervous system (cerebellum). // Brit. Med. J., 1906, **2**, P. 1799–1800.
- Fodstad H., Hariz M., Ljunggren B. History of Clarke's stereotactic instrument. // Stereotact. Funct. Neurosurg., 1991, **57**, No. 3, P. 130–140.
- Jensen R.L., Stone J.L., Hayne R.A. Introduction of the human Horsley-Clarke stereotactic frame. // Neurosurgery, 1996, **38**, No. 3, P. 563–567.
- Horsley V., Clarke R.H. The structure and functions of the cerebellum examined by a new method. // Brain, 1908, **31**, No. 1, P. 45–124. <http://brain.oxfordjournals.org/content/130/6/1449>.
- Akil H., Richardson D., Hughes J., Barchas J. Enkephalin-like material elevated in ventricular cerebrospinal fluid of pain patients after analgetic focal stimulation. // Science, 1978, **201**, No. 4354, P. 463–465.
- Al-Chaer E.D., Lawand N.B., Westlund K.N., Willis W.D. Pelvic visceral input into the nucleus gracilis is largely mediated by the postsynaptic dorsal column pathway. // J. Neurophysiol., 1996, **76**, No. 4, P. 2675–2690.
- Clarke R.H. Investigation of the Central Nervous System. Part I. Methods and Instruments.

- Part II. Atlas of Photographs of the Frontal Sections of the Cranium and Brain of the Rhesus Monkey. – John Hopkins press, 1920.
28. *Levy R.* A short history of stereotactic neurosurgery. – American Association of Neurological Surgeons, 1992. <http://www.neurosurgery.org/cybermuseum/stereotactichall/stereoarticle.html>.
 29. *Schaltenbrand G.* Personal observations on the development of stereotaxy. // *Confin. Neurol.*, 1975, **37**, No. 4, P. 410–416.
 30. *Olivier A., Bertrand G., Picard C.* Discovery of the first human stereotactic instrument. // *Appl. Neurophysiol.*, 1983, **46**, P. 84–91.
 31. *Dittmar C.* Ueber die Lage des sogenannten Ge-faesscentrums in der Medulla oblongata. Arbeiten aus der Physiologischen Anstalt zu Leipzig. 1873, P. 103–123. <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/ECHOdocuView?url=/permanent/vlp/lit1403/index.meta&start=11&viewMode=image&pn=1>, 2014.
 32. *Зернов Д.Н.* Энцефалометр: прибор для определения положения частей мозга у живого человека: Т-ство "Печатня С.П. Яковлева", 1892, <http://books.google.ru/books?id=TWCCGwAACAAJ>.
 33. *Алтухов Н.В.* Энцефалометрические исследования мозга в связи с полом, возрастом и черепным указателем. – СПб.
 34. *Gildenberg P.L.* Stereotactic versus stereotaxic. // *Neurosurgery*, 1993, **32**, No. 6, P. 965–966.
 35. *Dogliotti M.* First surgical sections, in man, of the lemniscal lateralis (pain-temperature path) at the brain stem, for the treatment of diffuse rebellious pain. // *Anesth. Analg.*, 1938, **17**, P. 143–145.
 36. *Schwartz H.G., O'Leary J.L.* Section of the spinothalamic tract in the medulla with observations on the pathways for pain. // *Surgery*, 1941, **9**, P. 183–193.
 37. *Walker A.E.* Relief of pain by mesencephalic tractotomy. // *Arch. Neurol. Psychiat.*, 1942, **48**, P. 865–883.
 38. *Keele K.D.* Anatomies of pain. – Baltimore, MD. Williams & Wilkins, 1949.
 39. *Livingston W.K.* Pain mechanisms. – New York, Macmillan, 1943.
 40. *Kirschner M.* Die Punktionstechnik und die Elektrokoagulationes Ganglion Gasseri. // *Arch. Klein. Chir.*, 1933, **176**, P. 581–620.
 41. *Cervico L.I., Pawlicki T., Lawson J. D., Jiang S.B.* Frameless and mask-less cranial stereotactic radiosurgery: a feasibility study. // *Phys. Med. Biol.*, 2010, **55**, No. 7, P. 1863–1873.
 42. *Gildenberg P.L. Ernest A. Spiegel 1895–1985.* // *Appl. Neurophysiol.*, 1985, **48**(1–6), I–VI.
 43. *Gildenberg P.L. Spiegel and Wycis – the early years.* // *Stereotact. Funct. Neurosurg.*, 2001, **77**(1–4), P. 11–16.
 44. *Spiegel E.A., Wycis H.T.* Stereoccephalotomy. Part II. – Philadelphia, Grune & Stratton, 1962.
 45. *Spiegel E.A., Wycis H.T., Marks M.P., Lee A.J.* Stereotaxic apparatus for operations on the human brain. // *Science*, 1947, **10**, No. 2754, P. 349–350.
 46. *Freeman W., Watts J.W.* Psychosurgery: intelligence, emotional and social behavior following prefrontal lobotomy for mental disorders. – Springfield, 1942.
 47. *Meyers R.* The modification of alternating tremors, rigidity and festination by surgery of the basal ganglia. // *Res. Publ. Ass. Res. Nerv. Ment. Dis.*, 1942, **21**, P. 602–665.
 48. *Meyers R.* Historical background and personal experiences in the surgical relief of hyperkinesia and hypertonus. // In: *Pathogenesis and treatment of parkinsonism. Fields W. (ed).* – Charles C Thomas, 1958, P. 229–270.
 49. *Spiegel E.A., Wycis H.T.* Stereoccephalotomy. Part I. – New York, 1952.
 50. *Spiegel E.A., Wycis H.T.* Pallido-thalamotomy in chorea. // *Arch. Neurol. Psychiatry.*, 1950, **64**, P. 495–496.
 51. *Gildenberg P.L.* The birth of stereotactic surgery: a personal retrospective. // *Neurosurgery*, 2004, **54**, No. 1, P. 199–207.
 52. *Narabayashi H., Okuma T.* Procaine oil blocking of the globus pallidus for the treatment of rigidity and tremor of parkinsonism. // *Proc. Jpn. Acad.*, 1953, **29**, P. 310–318.
 53. *Narabayashi H., Shimazu H., Fujita Y. et al.* Procaine-oil-wax pallidotomy for double athetosis and spastic states in infantile cerebral palsy. // *Neurology*, 1960, **10**, P. 61–69.
 54. *Cooper I.* Chemopallidectomy and chemothalamectomy for parkinsonism and dystonia. // *Proc. R. Soc. Med.*, 1959, **52**, P. 47–60.
 55. *Gildenberg P.L.* Studies in stereoccephalotomy. X. Variability of subcortical lesions produced by a heating electrode and Cooper's balloon-cannula. // *Confin. Neurol.*, 1960, **20**, P. 53–65.
 56. *Obrador S., Dierssen G.* Cirurgia de la region palidal. // *Revta Clin. Esp. Ano XVII*, 1956, **61**, P. 229–237.

57. Spiegel E.A. Guided brain operations. – Basel, Karger, 1982.
58. Gildenberg P.L. Functional neurosurgery. // In: Operative neurosurgical techniques. Schmidek H., Sweet W. (eds). Vol.II. New York, Grune & Stratton; 1982, P. 993–1043.
59. Leksell L.G.F. A stereotactic apparatus for intracerebral surgery. // Acta Chir. Scand., 1949, **99**, P. 229–233.
60. Leksell L.G.F. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. // Acta Chir. Scand., 1951, **102**, No. 4, P. 316–319.
61. Leksell L.G.F., Jernberg B. Stereotaxis and tomography a technical note. // Acta Neurochir. (Wien), 1980, **52**, (1–2), P. 1–7.
62. Hecaen H., Talairach J., David M., Dell M.D. Coagulations limiteres du thalamus dans les algies du syndrome thalamique. // Rev. Neurol. (Paris), 1949, **81**, P. 917–931.
63. Betti O.O., Derechinsky Y.E. Irradiations stereotaxiques multifaisceaux. // Neurochirurgie, 1982, **28**, P. 55–56.
64. Riechert T., Wolff M. Ueber ein neues Zielgeraet zur intrakraniellen elektrischen Abteilung und Ausschaltung. // Arch. Psychiatr. Nervenkr. Z., Gesamte Neurol. Psychiatr., 1951, **186**, No. 2, P. 225–230.
65. Bailey P., Stein S. A stereotaxic apparatus for use on the human brain. // AMA Sci. Exhibit., Atlantic City, 1951.
66. Narabayashi H. Stereotaxic instrument for operation on the human basal ganglia. // Psychiatr. Neurol. Jpn., 1952, **54**, P. 669–671.
67. Uchimura Y., Narabayashi H. Stereoencephalotom. // Psychiatr. Neurol. Jpn., 1951, **52**, P. 265.
68. Ohye C., Fodstad H. Forty years with professor Narabayashi. // Neurosurgery, 2004, **55**, P. 222–226.
69. Talairach J., Hecaen H., David M. et al. Recherches sur la coagulation therapeutique des structures souscorticales chez l'homme. // Rev. Neurol. (Paris), 1949, **81**, P. 224.
70. Guiot G., Brion S., Fardeau M. et al. Dyskinesie volitionelle d'attitude suppremee par la coagulation thalamo-capsulaire. // Rev. Neurol. (Paris), 1960, **102**, P. 220–229.
71. Riechert T., Wolff M. Die Entwicklung und klinische Bedeutung der gezielten Hirnoperationen. // Med. Klin., 1951, **46**, No. 21, P. 609–611.
72. Gillingham F.J. Small localised surgical lesions of the internal capsule in the treatment of the dyskinesias. // Confin. Neurol., 1962, **22**, P. 385–392.
73. Rossi G.F., Colicchio G., Gentilomo A., Scerrati M. Discussion on the causes of failure of surgical treatment of partial epilepsies. // Appl. Neurophysiol., 1978, **41**, (1–4), P. 29–37.
74. Bertrand G., Jasper H. Microelectrode recording of unit activity in the human thalamus. // Confin. Neurol., 1965, **26**, No. 3, P. 205–208.
75. Velasco Suarez M.M., Escobedo F.R. Stereotaxic intracerebral instillation of dopa. // Confin. Neurol., 1970, **32**, No. 2, P. 149–157.
76. Bechtereva N.P., Bondartchuk A.N., Smirnov V.M. et al. Method of electrostimulation of the deep brain structures in treatment of some chronic diseases. // Confin. Neurol., 1975, **37** (1–3), P. 136–140.
77. Kandel E.I. Experience with the cryosurgical method in production of lesions of the extrapyramidal system. // Confin. Neurol., 1965, **26**, No. 3, P. 306–309.
78. Bullard D.E., Nashold B.S. Evolution of principles of stereotactic neurosurgery. // Neurosurg. Clin. N. Amer., 1995, **6**, No. 1, P. 27–41.
79. Gildenberg P.L. Whatever happened to stereotactic surgery? // Neurosurgery, 1987, **20**, No. 6, P. 983–987.
80. Spiegel E.A. Methodological problems in stereoencephalotomy. // Confin. Neurol., 1965, **26**, No. 3, P. 125–132.
81. Spiegel E.A. History of human stereotaxy (stereoencephalotomy). // In: Stereotaxy of the human brain. Anatomical, Physiological and Clinical Applications. Schaltenbrand G., Walker A.E. (eds). – Georg Thieme Verlag, 1982, P. 3–10.
82. Gildenberg P.L. Survey of stereotactic and functional neurosurgery in the United States and Canada. // Appl. Neurophysiol., 1975, **38**, No. 1, P. 31–37.
83. Gildenberg P.L., Franklin P. Survey of CT-guided stereotactic surgery. // Appl. Neurophysiol., 1985, **48**, (1–6), P. 477–480.

Продолжение следует