

ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РОБОТИЗИРОВАННЫЙ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКИЙ МАНИПУЛЯТОР «ОРБИТА». ИСПЫТАНИЯ В НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ

Холявин А. И.¹, Бондаренко В. О.², Песков В. А.¹,
Полонский Ю. З.¹, Беляев Я. В.², Епифанов Д. О.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека
им. Н. П. Бехтерева Российской академии наук (ИМЧ РАН),

² ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург

THE DOMESTIC ROBOTIC STEREOTACTIC MANIPULATOR «ORBITA». NEUROSURGICAL OPERATING ROOM TESTS

Kholyavin A. I.¹, Bondarenko V. O.², Peskov V. A.¹,
Polonsky Y. Z.¹, Belyaev Y. V.², Epifanov D. O.²

¹ N. P. Bechtereva Institute of the Human Brain of the Russian Academy of Sciences,

² State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg

РЕЗЮМЕ:

Происходит активный процесс роботизации хирургии во всем мире. В нейрохирургии этот процесс в первую очередь развивается в направлении стереотаксиса. В настоящий момент ведется разработка первого российского роботизированного стереотаксического манипулятора «ОРБИТА».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: определение принципа работы, медико-технических требований и основных рабочих характеристик, а также подготовка к серийному выпуску автоматизированного манипулятора для стереотаксических операций на головном мозге.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ: разработан экспериментальный образец роботизированного манипулятора «ОРБИТА», представляющий собой компактную сочлененную конструкцию из нескольких кинематических узлов с шестью степенями свободы. Проводились ситуационные испытания манипулятора на фантоме в условиях нейрохирургической операционной. Управление манипулятором осуществляется с использованием внешней системы оптической нейронавигации.

РЕЗУЛЬТАТЫ: механические и медико-технические характеристики описываемого роботизированного манипулятора соответствуют требованиям, предъявляемым к манипуляторам безрамных навигационных систем для обеспечения возможности проведения стереотаксических операций на головном мозге.

ВЫВОДЫ: характеристики устройства позволяют использовать его при проведении всех видов стереотаксических операций на головном мозге, включая биопсии, интратимозговую имплантацию электродов, а также стереотаксические деструкции интратимозговых опухолей и подкорковых структур в функциональной нейрохирургии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стереотаксическое наведение, навигационные системы, роботохирургия.

ANNOTATION: surgery robotization around the world is in active process. In neurosurgery, this process primarily develops in the direction of stereotaxis. The development of the first Russian robotic stereotactic manipulator «ORBITA» is currently underway.

OBJECTIVE: determination of the principle of operation, medical, technical requirements and general working characteristics, and also preparation for serial production of an automated manipulator for stereotactic brain surgery.

MATERIAL AND METHODS: an experimental sample of the robotic manipulator «ORBITA» has been developed, which is a compact, articulated structure consisting of several kinematic nodes with six degrees of freedom. The manipulator was tested on a phantom in a neurosurgical operating room. The manipulator is controlled using an external optical neuronavigation system.

RESULTS: the mechanical, medical and technical characteristics of the described robotic manipulator meet the requirements for manipulators of frameless navigation systems to enable stereotactic operations.

CONCLUSION: the characteristics of the device allow its use in all types of stereotactic operations on the brain, including biopsies, intracerebral implantation of electrodes, as well as stereotactic destruction of intracerebral tumors and subcortical structures in functional neurosurgery.

KEY WORDS: stereotactic guidance, navigation systems, robotic surgery.

Введение.

В настоящее время в развитии хирургической техники отчетливо просматривается тенденция к усилению роли автоматизации. Параллельно с начавшимся успешным внедрением хирургических роботов в общехирургическую, кардиохирургическую и офтальмологическую операционную, усилился интерес к возможностям внедрения роботизированных манипуляторов и в области нейрохирургии. На данном этапе можно говорить о стереотаксисе как об отрасли нейрохирургии, в которой роботизация будет развиваться в первую очередь, благодаря, с одной стороны, высокой точности, требующейся для проведения операций, а с другой — сравнительно простым поступательным и вращательным движениям инструмента, характерным для нацеливания и введения стереотаксической канюли в мозг. В ряде клиник стереотаксические роботы используются уже в течение нескольких лет. Опубликованные данные об их применении при стереотаксической биопсии и имплантации внутримозговых электродов свидетельствуют об успешном развитии данного направления [1].

На первый взгляд может показаться, что имеющиеся в настоящее время стереотаксические роботы имеют слишком высокую стоимость, которая далеко не всегда окупается в процессе работы. Кроме того, нужно учитывать возрастающую зависимость успеха операции от корректной работы оборудования. Но если посмотреть на проблему внимательней, то можно сделать вывод, что стереотаксические роботы обладают рядом качеств, имеющих существенное значение при проведении операций, а именно: снижение трудоемкости операции; уменьшение риска случайных ошибок, связанных с человеческим фактором; увеличение точности нацеливания на внутримозговые мишени; укорочение общей продолжительности операции [2]. К тому же современная нейрохирургическая операционная в любом случае предполагает высокую насыщенность сложной техникой, требующей контроля и обязательного технического обслуживания. И если учесть неизбежное снижение себестоимости роботизированных манипуляторов с развитием их серийного производства, то можно прогнозировать четкие перспективы для их внедрения в клинику.

В 1993 г. Санкт-Петербургское предприятие ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с лабораторией стереотаксических методов ИМЧ РАН разработало и начало серийное изготовление отечественного стереотаксического манипулятора «Ореол» [3, 4, 5]. Всего было изготовлено 17 стереотаксических манипуляторов, которые использовались в различных клиниках России и СНГ. Особенность маркировки головы пациента при работе с этим манипулятором давала возможность выполнять томографию головного мозга в безрамных условиях. Разработки в области стереотаксического наведения, основанные на использовании манипулятора «Ореол» и современных методов нейровизуализации, позволили приступить к проектированию и подготовке к серийному выпуску первого отечественного роботизированного стереотаксического комплекса, получившего название «Орбита».

Цель работы.

Определение принципа работы, медико-технических требований и подготовка к серийному выпуску автоматизированного манипулятора для стереотаксических операций на головном мозге.

Материалы и методы.

Анализ действий и результата работы стереотаксического манипулятора во время операции показывает, что роль стереотаксического робота заключается в осуществлении (под управлением оперирующего нейрохирурга) механического перемещения и нацеливания стереотаксического инструмента в соответствии с предварительно подготовленным планом операции. Результат нацеливания определяется пространственным совмещением активного конца стереотаксического инструмента с запланированной (-ыми) целевой (-ыми) точкой (точками) мозга с погрешностью, не превышающей $\pm 0,5$ мм. Поступательное введение стереотаксического инструмента в мозг осуществляется вручную оперирующим нейрохирургом по траектории, проходящей через сформированное на черепе пациента отверстие, с возможностью коррекции траектории в процессе нацеливания инструмента.

В основе интраоперационного нацеливания стереотаксического инструмента на запланированные целевые точки мозга лежит предварительное выполнение предоперационной томографии головного мозга пациента с последующим осуществлением пространственной привязки между координатными системами мозга пациента и стереотаксического манипулятора [6, 7, 8]. В отличие от традиционных стереотаксических манипуляторов, где конечное положение инструмента в мозге пациента определяется положением шкал направляющих манипулятора в соответствии с заранее выполненными расчетами, для стереотаксических роботов требуется, чтобы положение инструмента в пространстве могло быть зафиксировано и отслежено в каждый момент времени при наведении на целевую точку. Это может быть осуществлено двумя способами.

Первый способ заключается в том, что положение определяется исключительно благодаря позиционным сенсорам кинематических узлов манипулятора, несущего инструмент. Для этого необходима взаимная пространственная привязка координатных систем манипулятора и головного мозга пациента, а также строгая неподвижность и неизменное положение основания манипулятора по отношению к голове пациента.

Второй способ состоит в отслеживании положения рабочего инструмента внешними датчиками, использующими принцип оптической навигации. Для отслеживания положения рабочего инструмента применяется метод оптической навигации с использованием внешних датчиков. Этот способ предполагает привязку координатной системы головного мозга к референтной рамке оптической навигации, жестко фиксированной к голове пациента, с использованием одного из методов интраоперационной регистрации головы пациента, и отображения в реальном времени положения стереотаксического инструмента (навигационного зонда)

в пространстве операционной относительно запланированной (-ых) целевой (-ых) точки (-ек).

Кроме того, для этого способа характерна реализация обратной связи между показаниями станции нейронавигации и перемещениями стереотаксического робота, что позволяет наводить стереотаксический инструмент на целевую точку.

Роботизированный манипулятор должен иметь достаточное количество степеней свободы перемещения инструмента, обеспечивающее независимое решение двух подзадач: а) нацеливание активного конца стереотаксического инструмента на внутримозговую мишень и б) настройка оптимальной траектории введения инструмента в целевую точку мозга. Оптимальным количеством является 6 степеней свободы. Точностные характеристики манипулятора должны обеспечивать абсолютную погрешность наведения стереотаксического инструмента на внутримозговую мишень не хуже $\pm 0,5$ мм в полезном объеме пространства не менее $0,4 \text{ м}^3$. Кроме того, при конструировании манипулятора необходимо предусмотреть обеспечение безопасности пациента в случаях непредвиденных отказов оборудования или внезапного прекращения подачи электрического питания. Также требуется обеспечить достаточную механическую жесткость узлов манипулятора — пространственная позиция узлов не должна меняться в условиях удерживания стереотаксического инструмента массой до 0,5 кг. Учитывая требования возможности отслеживания положения инструмента датчиками оптической навигации, конструкция манипулятора должна обеспечивать визуальную доступность маркеров нейронавигационной системы. Для быстрой коррекции траектории введения стереотаксического инструмента в целевую точку манипулятор должен иметь программный модуль эмуляции перемещений держателя инструмента по изоцентрической дуге, центр которой находится в целевой точке мозга. При проектировании манипулятора также учитывали санитарно-гигиенические требования Роспотребнадзора к изделиям медицинского назначения и медицинской технике.

Сконструированный в соответствии с вышеприведенными медико-техническими требованиями опытный образец манипулятора прошел ситуационные испытания в условиях нейрохирургической операционной. В качестве тестового объекта использовался фантом для моделирования стереотаксических операций [9], несущий маркеры навигационной системы для интраоперационной регистрации, а также имитаторы внутримозговых целевых точек.

Фантом предварительно был отсканирован при помощи мультиспирального рентгеновского компьютерного томографа GE Discovery 710, использовались срезы толщиной 0,625 мм и размером пиксела на томограмме, равным $0,5 \times 0,5$ мм. Томограммы загружали в навигационную станцию Medtronic StealthStation S7, которая в режиме оптической нейронавигации отслеживала перемещения манипулятора и позволяла осуществлять наведение инструмента на имитаторы целевых точек.

Результаты.

Экспериментальный образец роботизированного комплекса для стереотаксической нейрохирургии состоит из: механизированного манипулятора (стереотаксического робота), кронштейна для винтовой фиксации головы пациента, держателя стереотаксического инструмента и стойки управления с экраном (рис. 1). Манипулятор представляет собой сочлененную конструкцию, включающую несколько кинематических узлов с датчиками положения, обеспечивающих возможность перемещения несомого стереотаксического инструмента с шестью степенями свободы перемещения. Во время работы в операционной механизированный манипулятор покрывается стерильной драпировкой. Держатель инструмента имеет возможность фиксации и перемещения стереотаксических канюль и зондов на глубину до 160 мм с возможностью микроподачи в диапазоне ± 20 мм с дискретностью 0,1 мм; перед операцией держатель подлежит стерилизации.

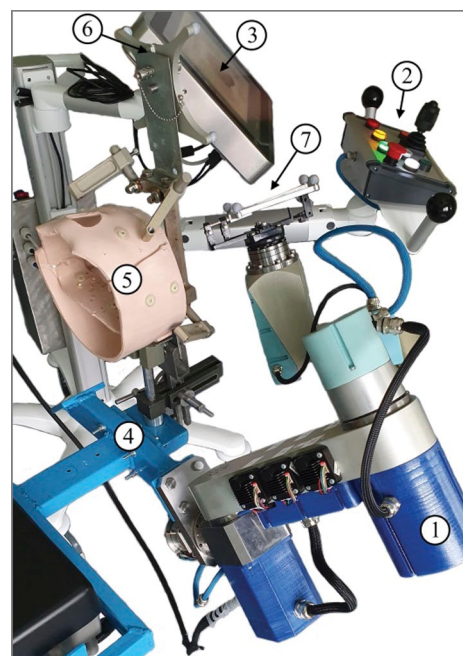


Рис. 1. Фантомные испытания стереотаксического манипулятора «ОРБИТА».

Рис. 1. Phantom tests of a stereotactic manipulator «ORBITA».

1 — экспериментальный образец механического манипулятора (стереотаксический робот), 2 — джойстик управления роботом, 3 — сенсорный экран управления роботом, 4 — кронштейн для винтовой фиксации головы пациента, 5 — модель головы пациента (фантом с целевыми мишенями), 6 — референтная рамка нейронавигации, 7 — держатель инструмента с укрепленным в нем зондом навигационной системы.

Кинематические узлы манипулятора содержат привода с позиционными сенсорами и фрикционными тормозными механизмами. Количество кинематических узлов, составляющих манипулятор, обеспечивает необходимое число (6) степеней свободы перемещения стереотаксического инструмента. При обесточивании манипулятора все его перемещения прекращаются, что

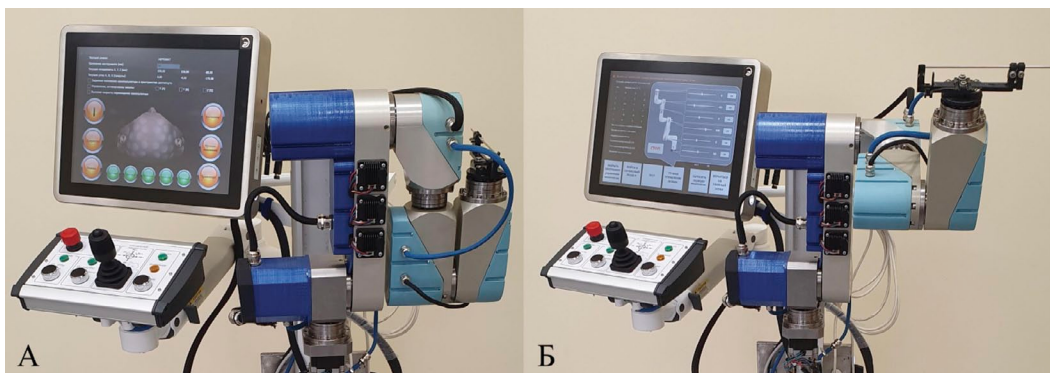


Рис. 2. Режимы работы стереотаксического манипулятора.

Pic. 2. Operating modes of the stereotactic manipulator.

А — экспериментальный образец стереотаксического манипулятора в неактивном состоянии,

Б — стереотаксический манипулятор в рабочем режиме.

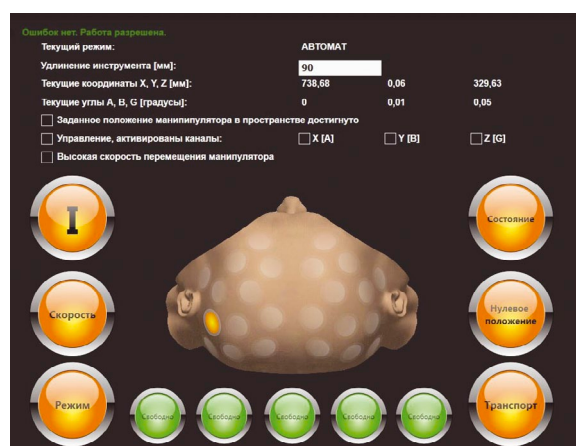


Рис. 3. Экран панели управления стереотаксического манипулятора.

Pic. 3. Stereotactic Manipulator Control Panel Screen.

обеспечивает безопасность пациента при проведении операций. В нерабочем состоянии манипулятор компактно складывается (рис. 2).

Управление перемещениями рабочего инструмента манипулятора осуществляется при помощи джойстика, расположенного на стойке управления, с возможностью стерильной драпировки джойстика и сенсорного экрана при сохранении их функциональности. После регистрации головы пациента одним из методов, предусмотренных станцией нейронавигации, в держатель инструмента помещается «короткий» зонд навигационной системы, предназначенный для нацеливания при подготовке стереотаксической биопсии (во время испытаний использовали зонд Navigus фирмы Medtronic, несущий маркеры нейронавигации). В соответствии с заданной программой, в начале работы манипулятор занимает положение, обеспечивающее визуализацию маркеров зонда датчиками навигационной системы. На экране панели управления отмечены оптимальные положения «начальных точек» рабочего инструмента манипулятора по отношению к голове пациента при работе в различных анатомических зонах головного мозга

(рис. 3). При нажатии на соответствующую кнопку, манипулятор автоматически переходит в положение, требующееся для работы в этой зоне.

Нацеливание на мишени осуществляли методом «виртуального удлинения» зонда Navigus (рис 4).

В режиме нацеливания на экране станции нейронавигации включали режим отображения томограмм в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (аксиальной, фронтальной и сагиттальной). В соответствующем пункте меню станции нейронавигации выставляли значение виртуального удлинения зонда до длины рабочего инструмента (биопсийной канюли, зонда для стереотаксической деструкции, или канюли для имплантации электрода).

Перемещения манипулятора осуществляются в следующих режимах: «Три плоскости» и «Изоцентр». При наведении манипулятора на целевую точку оператором под контролем станции нейронавигации, вначале включается режим «Три плоскости». В этом режиме, управляя джойстиком и используя три поступательные степени свободы манипулятора, добиваются совмещения виртуально удлиненного кончика зонда на экране нейронавигации с целевой точкой во всех трех взаимно перпендикулярных плоскостях пространства головного мозга. Далее включают режим «Изоцентр». В этом режиме, используя вращательные степени свободы перемещений манипулятора, при помощи джойстика осуществляют процесс выбора траектории стереотаксического доступа к целевой точке в соответствии с планом операции (ориентируясь по изображениям на экране навигационной станции) или в соответствии с положением наложенного на голову пациента фрезевого отверстия. Движения в этом режиме происходят по программе эмуляции перемещений держателя инструмента по изоцентрической дуге, центр которой находится в целевой точке мозга, на которую осуществлено наведение на предшествующем этапе. На экране навигации виртуально удлиненный кончик зонда остается в одном и том же пространственном положении, соответствующем целевой точке. Таким образом, положение конечной точки введения инструмента в мозг остается прежним, меняется лишь угол

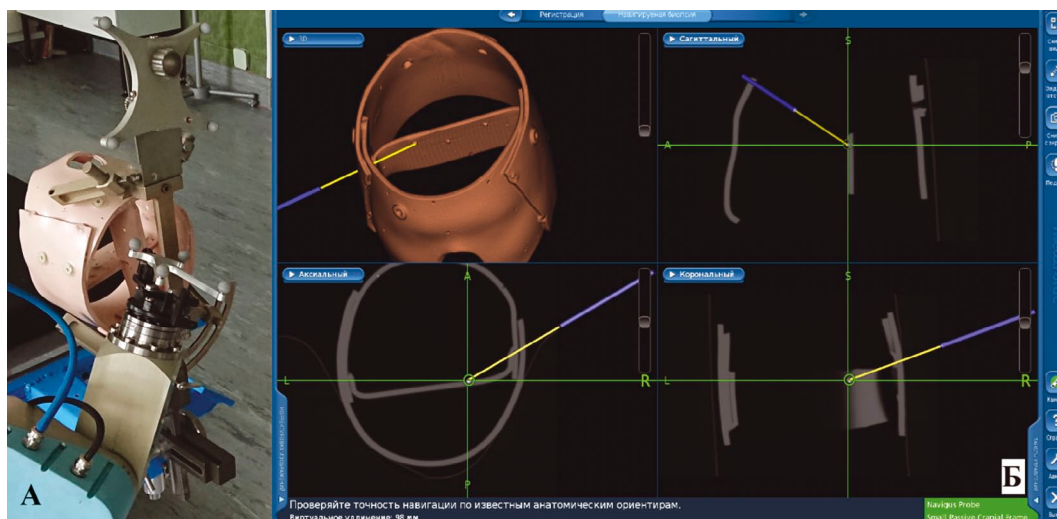


Рис. 4. Использование «короткого» зонда с оптическими маркерами и «виртуальным удлинением» для нацеливания на тестовый внутримозговой объект.

Pic. 4. The use of the «short» probe with optical markers and «virtual extension» for targeting a test intracerebral object.

А — манипулятор с зондом Navigus, Б — скриншот экрана нейронавигации.

стереотаксического доступа к ней. После наведения инструмента на целевую точку и выбора траектории пространственное положение манипулятора может быть записано путем нажатия соответствующей кнопки на экране блока управления и в последующем воспроизведено в любой момент операции.

После осуществления нацеливания, «короткий» зонд навигационной станции убирают из втулки держателя инструмента, и меняют его на стереотаксический инструмент (канюлю), длина которого соответствует виртуально удлинённому кончику зонда Navigus. Рабочий инструмент через втулку держателя вводят в мозг поступательным движением вручную, до упора стопорного ограничителя во втулку, что соответствует положению активного конца инструмента в целевой точке мозга. При моделировании операции с использованием фантома убеждались, что кончик канюли касается метки стереотаксического фантома, на который осуществлялось нацеливание.

Испытания манипулятора в условиях операционного пространства подтвердили возможность работы под контролем внешней системы оптической нейронавигации, а также пригодность конструкции и принципа работы блока управления манипулятора для проведения наведения на внутримозговые целевые точки. При помощи джойстика в режиме «Три плоскости» нацеливание на мишень осуществлялось в течение одной-двух минут. Также была отмечена безопасность перемещений конструктивных элементов манипулятора, не пересекающихся с зоной пространства, в которой находился фантом, имитирующий голову пациента. Во время перемещений в режиме «Три плоскости» плавное перемещение инструмента сопровождалось «скачкообразными» изменениями положениями виртуально удлинённого зонда на экране рабочей станции в режиме увеличения, что говорит о том, что манипулятор способен позиционировать стереотаксический

инструмент в пространстве с точностью, превышающей разрешающую способность навигационной станции.

Обсуждение.

Современные стереотаксические роботизированные устройства можно сгруппировать в три основные группы. Во-первых, это громоздкие самодостаточные конструкции, которые решают задачи и пространственной привязки, и наведения инструмента в мозг при помощи манипулятора, имеющего 5–6 степеней свободы (роботы «Neuromate», «Rosa») [10, 11, 12]. Их пространственная привязка к головному мозгу пациента осуществляется путем сопоставления координатных систем мозга и манипулятора, что и определяет сложность конструкции и высокую стоимость аппаратуры. Такие роботы зачастую для своей инсталляции требуют серьезного переоборудования операционной. В тех случаях, когда требуется стереотаксическая точность, пространственная регистрация головы пациента по отношению к данным дооперационной томографии проводится либо при помощи интраоперационной КТ, либо путем регистрации костно-имплантируемых маркеров. Вторая группа конструкций — облегченные устройства, крепящиеся к костям черепа (робот «Renaissance» фирмы Mazor Robotics [13]). И наконец, третья группа (робот «iSYS») занимает промежуточное положение [14, 15]. Такие автоматизированные манипуляторы крепятся к подголовнику операционного стола, при этом регистрация и нацеливание инструмента осуществляется средствами внешней навигационной системы.

Анализ имеющихся на рынке предложений показывает, что использование «автономных» стереотаксических роботов, не зависящих от внешнего оборудования и использующих встроенную систему навигации, мало оправдано из-за громоздкости конструкции, сложности интеграции в операционную и высокой продажной цены, не окупающейся при эксплуатации. Устройства,

удерживающиеся на голове благодаря фиксации к костям черепа, повышают травматичность хирургического вмешательства и требуют инвазивных условий проведения предоперационной стереотаксической томографии головного мозга пациента. Кроме того, такие роботы имеют меньшее количество степеней свободы, что затрудняет планирование и выполнение стереотаксических операций. Более перспективными представляются компактные роботизированные манипуляторы, работающие в связке с внешними системами нейронавигации. С одной стороны, это снижает стоимость оборудования и увеличивает доступность роботизированного манипулятора для клиник. С другой стороны, учитывая довольно большую распространенность нейронавигационных станций в нейрохирургических операционных, это позволяет легко интегрировать роботизированный манипулятор в операционную и в максимальной степени использовать возможности систем нейронавигации, в том числе, для стереотаксического планирования. Данный принцип и был использован при конструировании роботизированного стереотаксического комплекса, описываемого в данной статье.

Традиционно системы безрамной нейронавигации используются, главным образом, для навигационного обеспечения открытых операций. Тем не менее, наряду с функцией отслеживания инструмента, навигационные системы позволяют осуществлять и нацеливание его на внутримозговые мишени. Как правило, эта функция нейронавигации используется лишь для проведения стереотаксической биопсии и установки вентрикулярных катетеров, поскольку обычно считается, что точность безрамного стереотаксиса уступает точности стереотаксических рам [6, 16].

Однако измерения показывают, что оптический модуль систем безрамной навигации обладает высокой точностью позиционирования инструментов в пространстве [9, 17]. «Слабыми звеньями», ответственными за достаточно большую погрешность нацеливания с помощью навигации, являются идущие в комплекте навигационных станций манипуляторы для стереотаксических инструментов, конструктивно не предназначенные для высокоточного нацеливания, а также методы интраоперационной регистрации головы пациента навигационной системой, основанные на пространственной привязке к кожным покровам.

Между тем, известно, что, избавившись от вышеупомянутых «слабых звеньев», безрамная нейронавигация успешно применяется в ряде клиник для функциональных стереотаксических операций, в частности, имплантации электродов для DBS. Примером является использование системы Nexframe и костноимплантируемых маркеров для регистрации головы пациента [18, 19]. Кроме того, современные модели безрамных навигационных станций имеют программы для стереотаксического планирования и могут использоваться для проведения операции совместно со стереотаксическими рамами. Анализ конструкций существующих стереотаксических роботов показывает,

что все они идеологически относятся к «безрамному» направлению в стереотаксисе.

Проведенные нами ситуационные испытания показали, что механические точностные характеристики описываемого роботизированного манипулятора являются даже более высокими, чем точность оптического позиционирования датчиков и, таким образом, соответствуют требованиям, предъявляемых к манипуляторам безрамных навигационных систем для обеспечения возможности проведения стереотаксических операций. Следовательно, в качестве основного фактора, влияющего на результирующую погрешность описываемого стереотаксического манипулятора, выступает метод регистрации головы пациента. Поэтому в тех ситуациях, когда роботизированный манипулятор предполагается использовать для операций, допускающих погрешность в 3–4 мм (биопсия сравнительно крупных опухолей, вентрикулопункция и т.д.), возможно применять менее точные методы регистрации, такие как регистрация формы поверхности головы или использование накожных маркеров. При операциях, требующих более высокой точности стереотаксического наведения (имплантации электродов, стереотаксические деструкции [20]), необходимо использовать маркеры с фиксацией к костям черепа. В качестве неинвазивной альтернативы таким маркерам следует рассматривать предложенные нами ранее «навигационные» локализаторы со съемно-воспроизводимой фиксацией к голове пациента при помощи зубного отиска [21, 22].

Испытания манипулятора проводились в «полу-автоматическом» режиме, при котором предусматривается управление манипулятора оператором при помощи джойстика, по данным экрана нейронавигации. В дальнейшем, по согласованию с производителями навигационных систем, станет возможной полностью автоматическая работа манипулятора благодаря данным, получаемым контроллером манипулятора непосредственно от навигационной системы по интерфейсному кабелю. Следует отметить, что основная роль роботизированного манипулятора — прицеливание и определение направления введения инструмента. Непосредственно в мозг пациента стереотаксический инструмент вводит нейрохирург.

Работа по проектированию первого отечественного роботизированного стереотаксического манипулятора «Орбита» началась в 2017 г. К настоящему времени построен экспериментальный образец, проведены его ситуационные испытания, разработана конструкторская документация, ведется подготовка к изготовлению серийных образцов, проведению клинических испытаний, сертификации изделия. Начиная с 2021 г, ожидается начало серийного выпуска роботизированного стереотаксического комплекса для операций на головном мозге.

Выводы.

Разработан и подготовлен к серийному изготовлению первый отечественный роботизированный комплекс для проведения стереотаксических операций на головном мозге. Компактность конструкции

и возможность взаимодействия с существующими станциями безрамной нейронавигации обеспечивают простую и быструю интеграцию стереотаксического роботизированного манипулятора в нейрохирургическую операционную. Характеристики устройства позволяют использовать его при проведении всех видов стереотаксических операций на головном мозге, включая биопсии, внутримозговую имплантацию электродов, а также стереотаксические деструкции внутримозговых опухолей и подкорковых структур в функциональной нейрохирургии.

Исследования проведены в рамках плановых инженерных разработок ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ

«Электроприбор», а также НИР «Разработка стереотаксической аппаратуры и методов стереотаксической нейрофизиологии, нейровизуализации и локальных воздействий на ткань мозга для улучшения результатов малоинвазивного лечения заболеваний центральной нервной системы» ИМЧ РАН 2018–2020 гг.

ORCID авторов:

Холявин Андрей Иванович — 0000-0003-1934-5458

Бондаренко Виктор Олегович — 0000-0003-2200-9949

Песков Виктор Александрович — 0000-0002-2918-2771

Полонский Юрий Зусьевич — 0000-0001-7294-9246

Беляев Ярослав Викторович — 0000-0001-5397-769X

Епифанов Дмитрий Олегович — 0000-0001-6338-9111

ЛИТЕРАТУРА

1. von Langsdorff, D. In vivo measurement of the frame-based application accuracy of the neuromate neurosurgical robot / D. von Langsdorff, P. Paquis, D. Fontaine // J Neurosurg. — 2015. — Vol. 122(1). — P. 191–194. <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS14256>
2. Cardinale, F. A new tool for touch-free patient registration for robot-assisted intracranial surgery: application accuracy from a phantom study and a retrospective surgical series / F. Cardinale, M. Rizzi, P. d'Orio et al. // Neurosurg Focus. — 2017. — Vol. 42 (5). — E8. <https://doi.org/10.3171/2017.2.FOCUS16539>
3. Аничков, А. Д. Новая универсальная стереотаксическая система / А. Д. Аничков, М. А. Никитин, Ю. З. Полонский и соавт. // Актуальные вопросы стереонейрохирургии эпилепсии / Под ред. В. П. Берснева. — СПб.: РНХИ, 1993. — С. 177–187. [Anichkov, A. D. Novaya universal'naya stereotaksicheskaya sistema / A. D. Anichkov, M. A. Nikitin, Yu. Z. Polonskii, A. B. Popov, V. B. Nizkovolos, A. V. Oblyapin, N. G. Shkurina // Aktual'nye voprosy stereoneirokhirurgii epilepsii / Pod red. V. P. Bersneva. — SPb.: RNKHI, 1993. — p. 177–187. (in Russ)]
4. Никитин, М. А. Стереотаксический манипулятор «Ореол» / М. А. Никитин // Клинический стереотаксис. Опыт и перспективы применения отечественного нейрохирургического манипулятора «Ореол»: СПб., 2001. — С. 6–8. [Nikitin, M. A. Stereotaksicheskii manipulyator «Oreol» / M. A. Nikitin // Klinicheskii stereotaksis. Opyt i perspektivy primeneniya otechestvennogo neurokhirurgicheskogo manipulyatora «Oreol»: SPb., 2001. — p. 6–8. (in Russ)]
5. Полонский, Ю. З. Безрамная расчетная магнитно-резонансная томография со стереотаксическими манипуляторами класса «Ореол» / Ю. З. Полонский, А. И. Холявин, Б. В. Мартынов и соавт. // Вестник Российской Военно-медицинской академии. 2009. — № 4 (28). — С. 71–78. [Polonskii, Yu. Z. Bezramnaya raschetnaya magnitno-rezonansnaya tomografiya so stereotaksicheskimi manipulyatorami klassa «Oreol» / Yu. Z. Polonskii, A. I. Kholiavin, B. V. Martynov, V. E. Parfenov, G. E. Trufanov // Vestnik Rossiiskoi Voenno-meditsinskoi akademii. — 2009. — № 4 (28). — P. 71–78. (in Russ)]
6. Textbook of Stereotactic and Functional Neurosurgery / A. M. Lozano, P. N. Gildenberg, R. R. Tasker (eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. — 2009. — 3288 P.
7. Аничков, А. Д. Стереотаксические системы / А. Д. Аничков, Ю. З. Полонский, В. Б. Низковолос. — СПб.: Наука, 2006. — 142 с. [Anichkov, A. D. Stereotaksicheskie sistemy / A. D. Anichkov, Yu. Z. Polonskii, V. B. Nizkovolos. — SPb.: Nauka, 2006. — 142 p. (in Russ)]
8. Холявин, А. И. Методы наведения в современной стереотаксической нейрохирургии / А. И. Холявин, А. Д. Аничков. — М.: Российская академия наук, 2017. — 170 с. [Kholiavin, A. I. Metody navedeniya v sovremennoi stereotaksicheskoi neurokhirurgii / A. I. Kholiavin, A. D. Anichkov. — M.: Rossiiskaya akademiya nauk, 2017. — 170 p. (in Russ)]
9. Холявин, А. И. Оценка качества наведения стереотаксического инструмента на целевую точку мозга при использовании безрамной навигационной системы / А. И. Холявин, В. Б. Низковолос, А. А. Богдан // Медицинская техника. — 2018. — № 2 (308). — С. 16–19. [Kholiavin, A. I. Otsenka kachestva navedeniya stereotaksicheskogo instrumenta na tselevuyu tochku mozga pri ispol'zovanii bezramnoi navigatsionnoi sistemy / A. I. Kholiavin, V. B. Nizkovolos, A. A. Bogdan // Meditsinskaya tekhnika. — 2018. — № 2 (308). — P. 16–19. (in Russ)]
10. Li, Q. H. The application accuracy of the NeuroMate robot. A quantitative comparison with frameless and frame-based surgical localization systems / Q. H. Li, L. Zamorano, A. Pandya et al. // Comput Aided Surg. 2002. — Vol. 7. — P. 90–98.
11. Varma, T. R. K. Use of the NeuroMate stereotactic robot in a frameless mode for functional neurosurgery / T. R. K. Varma, P. Eldridge // Int J Med Robot. — 2006. — Vol. 2. — P. 107–113.
12. Brandmeir, N. J. The comparative accuracy of the ROSA stereotactic robot across a wide range of clinical applications and registration techniques / N. J. Brandmeir, S. Savaliya, P. Rohatgi et al. // J Robotic Surg. — 2018. — Vol. 12(1). — P. 157–163.
13. Ho, A. L. Frameless robot-assisted deep brain stimulation surgery: an initial experience / A. L. Ho, A. V. Pendharkar, R. Brewster et al. // Oper Neurosurg (Hagerstown). — 2019. — Vol. 17(4). — P. 424–431.
14. Minchev, G. Application of the iSYS1 robotic device for stereotactic neurosurgical interventions: a preclinical phantom trial / G. Minchev, G. Kronreif, L. Holton et al. // Proceedings CURAC. — 2013. — P. 88–91.
15. Minchev, G. A novel miniature robotic guidance device for stereotactic neurosurgical interventions: preliminary experience with the iSYS1 robot / G. Minchev, G. Kronreif, M. Martinez-Moreno et al. // J Neurosurg. — 2017. — V. 126. — P. 985–996.

16. Shamir, R. R. Localization and registration accuracy in image guided neurosurgery: a clinical study / R. R. Shamir, L. Joskowicz, S. Spektor et al. // *Int J Comput Assist Radiol Surg.* — 2009. — Vol. 4. — P. 45–52.
17. Kaushik, A. Autonomous neuro-registration for robot-based neurosurgery / A. Kaushik, T. A. Dwarakanath, G. Bhutani // *Int J CARS.* — 2018. — V. 13. — P. 1807–1817.
18. Holloway, K. L. Frameless stereotaxy using bone fiducial markers for deep brain stimulation / K. L. Holloway, S. E. Gaede, P. A. Starr et al. // *J Neurosurg.* — 2005. — Vol. 103. — № 3. — P. 404–413.
19. Toms, J. A comparative study of fiducial-based and fiducial-less registration utilizing the O-arm / J. Toms, S. Martin, A. P. Sima et al. // *Stereotact Func Neurosurgery.* — 2019. — Vol. 97(2). — P. 83–93.
20. Kholyavin, A. Development of the robotic complex for the stereotactic cryosurgery of the intracerebral tumors and temporal lobe epilepsy / A. Kholyavin, V. Bondarenko, J. Polonsky et al. // *Stereotactic and Functional Neurosurgery.* — 2019. — Vol. 97. — P. 39–40.
21. Холявин, А. И. Прецизионная стереотаксическая безрамная нейронавигация / А. И. Холявин, В. Б. Низковолос // *Медицинская техника.* — 2016. — № 4. — С. 26–28. [Kholyavin, A. I. Pretsizionnaya stereotaksicheskaya bezramnaya neironavigatsiya / A. I. Kholyavin, V. B. Nizkovolos // *Meditsinskaya tekhnika.* — 2016. — № 4. — P. 26–28. (in Russ)].
22. Пат. 2607404 Российская Федерация, МПК А 61 В 34/20. Способ маркировки головы пациента при работе с безрамной нейронавигацией / Холявин А. И., Низковолос В. Б., Аничков А. Д., Полонский Ю. З.; заявитель и патентообладатель ИМЧ РАН. — 2015117998; заявл. 13.05.2015, опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. — 2 с. [Pat. RU2607404 C2, МПК А 61 В 34/20. Sposob markirovki golovy patsienta pri rabote s bezramnoi neironavigatsiei / Kholyavin A. I., Nizkovolos V. B., Anichkov A. D., Polonskii Yu. Z.; zayavitel i patentoobladatel IHB RAS. — 2015117998; zayavl. 13.05.2015, opubl. 10.01.2017, BI № 1. — 2 с. (in Russ)]