

Сравнение прицельной точности двух способов стереотаксического наведения на целевые точки головного мозга

Аннотация

Описано устройство, позволяющее проводить бесконтактные измерения погрешности стереотаксического наведения, осуществляемого с использованием разных видов аппаратуры для нейрохирургических операций на головном мозге. Проведено сравнение прицельной точности двух различных способов использования отечественной стереотаксической системы «ПОАНИК». Результаты позволяют отказаться от механического моделирования внутримозгового пространства во время операции, что ведет к снижению продолжительности и трудоемкости проведения вмешательства.

Введение

Различные виды аппаратуры для стереотаксических операций применяются с середины 20-го века [1]. Наиболее востребована стереотаксическая техника в нейроонкологии, где стереотаксическое наведение используется для биопсии опухолей головного мозга и локальных деструкций глубинных новообразований [2]. Также часто стереотаксические операции проводят при лечении пациентов с болезнью Паркинсона методом глубокой стимуляции через внутримозговые электроды [3]. Кроме того, эти вмешательства могут использоваться при лечении некоторых других заболеваний ЦНС: спастической кривошеи, эпилепсии, обсессивно-компульсивного синдрома и т. д. [4].

Одним из факторов, существенно влияющих на результат операции, является прицельная точность введения стереотаксической канюли в намеченную на дооперационной томограмме целевую точку мозга. Наиболее эффективны операции, при которых погрешность не превышает 1,5 мм, что связано с размерами внутримозговых структур-мишеней. Увеличение погрешности выше этого значения, как правило, негативно влияет на результаты вмешательства [5]. Современные рамные стереотаксические системы обеспечивают среднюю результирующую погрешность наведения 1,2...1,9 мм [6], [7]. Безрамные системы хирургической навигации, более удобные в использовании, при стандартном варианте работы характеризуются несколько большей погрешностью – в среднем 2,5 мм и более [6], [8]. Однако модифицированная методика, предусматривающая имплантацию реперных маркеров оптической безрамной навигации в кости черепа пациента, демонстрирует снижение средней погрешности до 1,25 мм [9].

В 1993 году Санкт-Петербургским предприятием ЦНИИ «Электроприбор» совместно с Институтом мозга человека (ИМЧ РАН) была разработана стереотаксическая система «ПОАНИК», применяемая для проведения операций на головном мозге в ИМЧ РАН и ряде других клиник России и СНГ [10]. Система имеет рамную конструкцию. При этом ее преимуществом перед остальными рамными стереотаксическими

системами является возможность выполнения предоперационной томографии головного мозга пациента (обязательной для всех стереотаксических операций) без установки рамы на голову пациента. «Связующим звеном» между томографией и операцией служит стереотаксический локализатор, съемно и воспроизводимый фиксируемый к голове при помощи прикусывания пациентом индивидуального зубного оттиска, к которому и крепится локализатор. Указанный способ наведения (способ № 1) предполагает интраоперационное моделирование пространства головного мозга при помощи механического фантома стереотаксической системы «ПОАНИК» [11].

В дальнейшем в лаборатории стереотаксических методов ИМЧ РАН был разработан альтернативный способ наведения на целевые точки мозга с использованием стереотаксической системы «ПОАНИК» (способ № 2) [12]. Этот способ включает в себя взаимодействие во время операции с системой оптической безрамной навигации, а для моделирования пространства головного мозга вместо механического фантома применяется виртуальная модель, созданная навигационной системой. Предварительные измерения показали, что средняя погрешность наведения при использовании нового способа, в зависимости от режима работы оптической хирургической навигации, составляет от 0,5 до 1,4 мм [13].

Цель исследования

Сравнение двух способов возможного использования стереотаксической системы «ПОАНИК» в отношении достигаемой точности наведения на целевые точки мозга, а также изучение условий применения этих методов, позволяющих добиться минимальной погрешности стереотаксического наведения.

Материалы и методы

В ходе исследования для наведения использовали стереотаксическую систему «ПОАНИК» (производство АО ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», Россия), включающую в себя нейрохирургический манипулятор «Ореол», стереотаксические локализаторы и программное обеспечение. Кроме того, была использована оптическая система безрамной хирургической

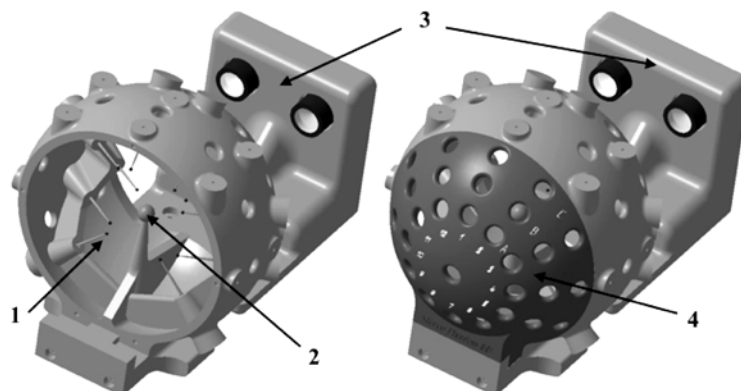


Рис. 1. Стереоскопический фантом со снятой крышкой и в сборе: 1 – целевые мишени; 2 – центральная метка; 3 – модуль стереозрения; 4 – отверстия для нацеливания лазерной указки датчиков системы безрамной навигации

навигации «Medtronic StealthStation S7» (производство «Medtronic plc», США). Для измерения погрешности стереотаксического наведения применяли разработанный в лаборатории стереотаксических методов ИМЧ РАН стереоскопический фантом [14].

Фантом состоит из двух модулей: модуль «голова фантома» и модуль стереозрения. Модуль стереозрения является измерительным устройством и позволяет бесконтактно оценивать точность наведения. Модуль «голова фантома» представляет собой сферу диаметром 150 мм, имеющую крепление к операционному столу. Внутри расположены воспроизводимо съемные целевые мишени, имитирующие целевые точки головного мозга, а также центральная метка в виде шара диаметром 10 мм, располагающаяся в центре сферы (рис. 1).

Модуль имеет съемную крышку с отверстиями, располагающимися в сферической системе координат с заданными параметрами азимутального и зенитного углов. При отсоединении крышки появляется доступ к целевым мишеням со стороны планируемого стереотаксического доступа.

К модулю «голова фантома» съемно и воспроизводимо крепятся модуль стереозрения и стереотаксический локализатор, конструкция которого была описана нами ранее [15]. Модуль стереозрения представляет собой стойку с двумя цифровыми камерами в стереопаре. Цифровые камеры подключены к ЭВМ с программой компьютерного зрения. Алгоритмы позволяют обрабатывать изображения с обеих камер и путем триангуляции получать координаты объектов, помещенных в пространство фантома. В результате определения координат объектов (мишеней и кончика инструмента) появляется возможность бесконтактно определять расстояние между объектами.

Воспроизводимо съемные целевые мишени представляют собой сферы диаметром 2,5 мм, расположенные на несущих стержнях. Сферическая форма мишени позволяет легко определить ее центр на томограммах и на изображениях с камер модуля стереозрения. Съемность и воспроизводимость положения мишени осуществляются путем выкручивания несущего стержня из основания.

После сканирования фантома на компьютерном томографе и измерений на томограммах становится возможным получить координаты мишени в системе координат стереотаксического локализатора [16], что в дальнейшем используется для наведения на мишень при помощи стереотаксического аппарата. Если загрузить томограммы в навигационную станцию, то при помощи ее программного обеспечения строится пространственная модель фантома, пригодная для регистрации и нацеливания на мишень средствами безрамной навигации.

После регистрации мишени модулем стереозрения мишень выкручивают из основания, благодаря чему остается свободное пространство для локализации кончика инструмента, который оформлен в виде сферы, аналогичной целевым мишеням. Таким образом, модуль стереозрения последовательно фиксирует координаты мишени и координаты кончика инструмента, наведенного на мишень при помощи стереотаксического аппарата или навигационной системы. Далее ЭВМ вычисляет расстояние между мишенью и кончиком инструмента, а также расстояние по каждой из трех координат. Результаты данных измерений и представляют собой погрешность стереотаксического наведения.

Дополнительной опцией является применение центральной метки и отверстий крышки фантома для пространственной локализации системы оптической навигации. Если направлять лазерную указку, которой снабжена система камер навигации, через отверстия в сфере на центральную метку, то зенит и азимут положения камер по отношению к фантому будут равны заданным координатам отверстий. Таким образом, становится известно положение камер навигации в пространстве операционной по отношению к фантому. Это позволяет изучать влияние угла наклона датчиков оптической навигации на величину погрешности наведения. Эта опция, а также возможность бесконтактных измерений являются преимуществами по

сравнению с ранее разработанным нами фантомом для определения погрешности стереотаксического наведения [13].

На первом этапе исследования было осуществлено сканирование стереоскопического фантома, имитирующего голову пациента, на мультиспиральном компьютерном томографе «GE Discovery 710» (производство «General Electric», США) срезами с шагом 0,625 мм и размером пикселя на томограмме, равным 0,5 x 0,5 мм. Во время сканирования к фантому съемно и воспроизводимо фиксировали стереотаксический локализатор, несущий одновременно и метки в виде конических углублений (применяемые для регистрации системой навигационной станции), и три шаровидные метки (применяемые для проведения расчетов стереотаксической системой «ПОАНИК»). Таким образом, локализатор мог использоваться и как локализатор для стереотаксической системы «ПОАНИК» [16], и как навигационный локализатор [15].

На втором этапе проводили измерения погрешности стереотаксического наведения, осуществляемого по исходному способу использования стереотаксической системы [16]. Для этого, кроме фантома, имитирующего голову пациента, использовали также механический фантом системы «ПОАНИК», применяющийся на операциях для моделирования внутримозгового пространства. На томограммах определяли координаты X, Y и Z центров шариков, расположенных на локализаторе, а также координаты имитаторов целевых точек. Полученные значения вносили в программу стереотаксических расчетов и получали распечатку с координатами для моделирования на механическом фантоме.

К стереоскопическому фантому через подголовник фиксировали раму стереотаксического манипулятора и осуществляли пространственную механическую привязку между ней и локализатором (рис. 2).

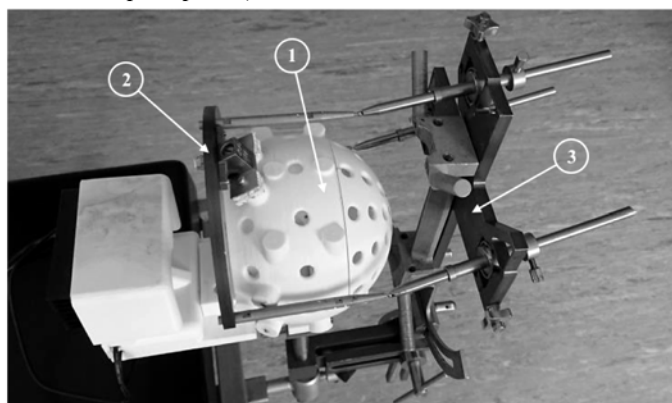


Рис. 2. Механическая привязка рамы стереотаксического аппарата и локализатора: 1 – стереоскопический фантом; 2 – стереотаксический локализатор; 3 – рама стереотаксического аппарата

В соответствии с достигнутой привязкой укрепляли имитатор основания стереотаксического манипулятора на механическом фантоме, имитирующем внутримозговое пространство. Осуществляли построения на фантоме по результатам стереотаксических расчетов и затем нацеливали имитатор стереотаксического инструмента на целевую точку при помощи наводящего устройства манипулятора (рис. 3). Затем наводящее устройство переносили на раму манипулятора, укрепленную на фантоме, имитирующем голову пациента, и вводили инструмент по запланированной траектории. Погрешность наведения на целевую точку оценивали при помощи стереопары видеокамер фантома.

На третьем этапе проводили измерения погрешности стереотаксического наведения, осуществляемого по второму способу, без применения механического фантома.

Томограммы пациента загружали в навигационную станцию, при помощи ее программного обеспечения обозначали целевые точки фантома. Осуществляли регистрацию маркеров локализатора, прикрепленного к фантому, имитирующему

голову пациента, оптическими сенсорами навигационной системы по методу PointMerge. На основании стереотаксического манипулятора устанавливали наводящее устройство с изоцентрической дугой, к которой фиксировали «короткий» зонд «Navigus». После этого осуществляли нацеливание манипулятора на мишень с использованием «виртуального удлинения» кончика зонда [17], который совмещали с меткой, обозначающей целевую точку, на экране станции навигации, и перемещения направляющих наводящего устройства манипулятора в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Достигнутое положение фиксировали стопорными винтами и вместо зонда укрепляли в наводящем устройстве стереотаксический инструмент. Определяли погрешность наведения на мишень при помощи видеокамер стереоскопического фантома. Измерения проводили при различных положениях камер системы навигации, определяемых при помощи лазерной указки и системы отверстий в съемной крышке стереоскопического фантома.

Всего было проведено по 30 стереотаксических наведений каждым из вышеописанных способов. В протокол испытаний сохраняли векторную погрешность наведения на целевую мишень, а также погрешности наведения по каждой из трех координатных осей (X , Y , Z), начало координат которых соответствовало центру мишени, а направление – стандартным координатным осям компьютерного томографа.

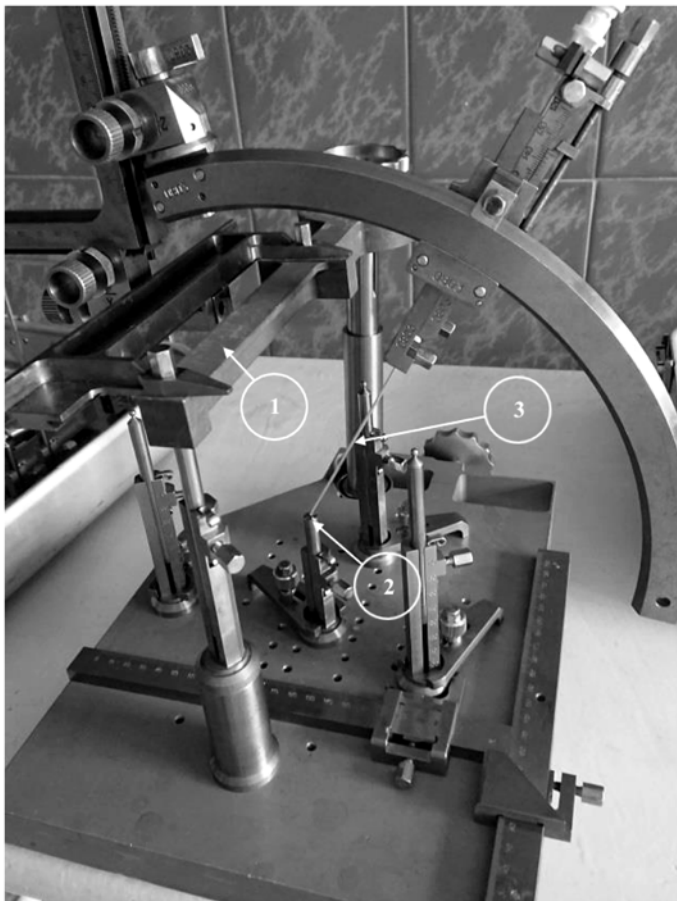


Рис. 3. Механический фантом системы «ПОАНИК»:

1 – имитатор рамы стереотаксического манипулятора;
2 – имитатор целевой точки; 3 – имитатор стереотаксического инструмента

Результаты

Точностные характеристики исследуемых способов стереотаксического наведения имеют статистически значимое различие $p < 0,05$ (p -value = $1,208 \cdot 10^{-6}$, критерий Манна-Уитни-Вилкоксона), а значит, точность наведения с использованием второго способа выше (рис. 4а, б).

Наведение по второму способу обладает меньшей средней погрешностью ($0,65 \pm 0,32$ мм) по сравнению с первым способом, основанным на механическом моделировании на фантоме ($1,05 \pm 0,2$ мм). При использовании второго способа наименьшая погрешность отмечена при положении, обозначенном В3 (отклонения по каждой из трех координатных осей не превышают 0,5 мм). Для этого положения углы наклона датчиков по отношению к плоскости референтной рамки навигационной системы равны 30° по вертикальной оси (зенит) и 45° по горизонтальной оси (азимут).

Заключение

Погрешность стереотаксического наведения является важным параметром, влияющим на результаты стереотаксических операций на головном мозге. В лаборатории стереотаксических методов ИМЧ РАН разработано устройство, позволяющее проводить бесконтактные измерения погрешности стереотаксического наведения, осуществляемого с использованием различного нейрохирургического инструментария (стереотаксических аппаратов, безрамных навигационных систем). В ходе проведенных измерений осуществлено сравнение прицельной точности двух способов наведения на внутримозговые мишени, реализуемых отечественной стереотаксической системой «ПОАНИК». Установлено, что стереотаксическое наведение на внутримозговые мишени с использованием навигационного локализатора и системы оптической безрамной навигации обладает меньшей погрешностью ($0,65 \pm 0,32$ мм) по сравнению с применяемым ранее стереотаксическим наведением на основе интраоперационного моделирования внутримозгового пространства на механическом фантоме ($1,05 \pm 0,2$ мм). Указанные значения отражают экспериментально измеренную погрешность; результирующая погрешность во время операции, вероятно, может быть больше. Также установлено, что для достижения минимальной погрешности наведения углы наклона оптической оси датчиков навигационной системы по отношению к плоскости референтной рамки должны быть равны 30° по вертикальной оси и 45° по горизонтальной оси. Экспериментальное обоснование более высокой точности новой методики стереотаксического наведения дает возможность отказаться от использования механического моделирования внутримозгового пространства во время стереотаксической операции. Это позволит снизить продолжительность и трудоемкость проведения хирургического вмешательства при работе со стереотаксической системой «ПОАНИК», применяемой в ряде нейрохирургических клиник России и СНГ при проведении операций на головном мозге у пациентов.

Список литературы:

1. Кандель Э.И. Функциональная и стереотаксическая нейрохирургия. – М.: Медицина, 1981. 367 с.
2. Мартынов Б.В., Холявин А.И., Парфенов В.Е. и др. Метод стереотаксической криодеструкции в лечении больных с глиомами головного мозга // Вопросы нейрохирургии им. Н.Н. Бурденко. 2011. № 4. С. 17-24.
3. Starr P.A. Placement of deep brain stimulators into the subthalamic nucleus or globus pallidus internus: Technical approach // Stereotactic and Functional Neurosurgery. 2002. Vol. 79. PP. 118-145.
4. Аничков А.Д., Полонский Ю.З., Низковолос В.Б. Стереотаксические системы. – СПб.: Наука, 2006. С. 142.
5. Ellis T.M., Foote K.D., Fernandez H.H. et al. Reoperation for suboptimal outcomes after deep brain stimulation surgery // Neurosurgery. 2008. Vol. 63 (4). PP. 754-760.
6. Benardete E.A., Leonard M.A., Weiner H.L. Comparison of frameless stereotactic systems: Accuracy, precision, and applications // Neurosurgery. 2001. Vol. 49 (6). PP. 1409-1415.
7. Maciunas R.J., Galloway Jr R.L., Latimer J.W. The application accuracy of stereotactic frames // Neurosurgery. 1994. Vol. 35 (4). PP. 682-694.

8. *Bjartmarz H., Rehncrona S.* Comparison of Accuracy and Precision between Frame-Based and Frameless Stereotactic Navigation for Deep Brain Stimulation Electrode Implantation // *Stereotactic and Functional Neurosurgery.* 2007. Vol. 85. № 5. PP. 235-242.
9. *Henderson J.M., Holloway K.L., Gaede S.E., Rosenow J.M.* The application accuracy of a skull-mounted trajectory guide system for image-guided functional neurosurgery // *Comput. Aided Surg.* 2004. Vol. 9 (4). PP. 155-160.
10. *Никитин М.А.* Стереотаксический манипулятор «Ореол» / В кн.: *Клинический стереотаксис. Опыт и перспективы применения отечественного нейрохирургического манипулятора «Ореол».* – СПб., 2001. С. 6-8.
11. *Аничков А.Д., Никитин М.А., Попов А.Б.* Фантом стереотаксического аппарата / Патент РФ на изобретение № 2023434. Оpubл. 30.11.1994. БИ № 22.
12. *Холявин А.И., Низковолос В.Б., Аничков А.Д., Полонский Ю.З.* Способ маркировки головы пациента при работе с безрамной нейронавигацией / Патент РФ на изобретение № 2607404. Оpubл. 10.01.2017. БИ № 1.
13. *Холявин А.И., Низковолос В.Б., Богдан А.А.* Оценка качества наведения стереотаксического инструмента на целевую точку мозга при использовании безрамной навигационной системы // *Медицинская техника.* 2018. № 2. С. 16-19.
14. *Песков В.А., Холявин А.И.* Устройство для моделирования стереотаксических нейрохирургических вмешательств / Патент РФ на полезную модель № 199805. Оpubл. 21.09.2020. БИ № 27.
15. *Песков В.А., Холявин А.И., Полонский Ю.З.* Локализаторы для безрамных нейронавигационных систем // *Медицинская техника.* 2020. № 2. С. 7-10.
16. *Полонский Ю.З., Холявин А.И., Мартынов Б.В. и др.* Безрамная расчетная магнитно-резонансная томография со стереотаксическими манипуляторами класса «Ореол» // *Вестник Российской Военно-медицинской академии.* 2009. № 4 (28). С. 71-78.
17. *Холявин А.И., Низковолос В.Б.* Прецизионная стереотаксическая безрамная нейронавигация // *Медицинская техника.* 2016. № 4. С. 26-28.

*Андрей Иванович Холявин,
д-р мед. наук, зав. лабораторией,
Виктор Александрович Песков,
аспирант,
лаборатория стереотаксических методов,
ФГБУН «Институт мозга человека
им. Н.П. Бехтеревой» РАН,
г. С.-Петербург,
e-mail: Kholjavin@mail.ru*

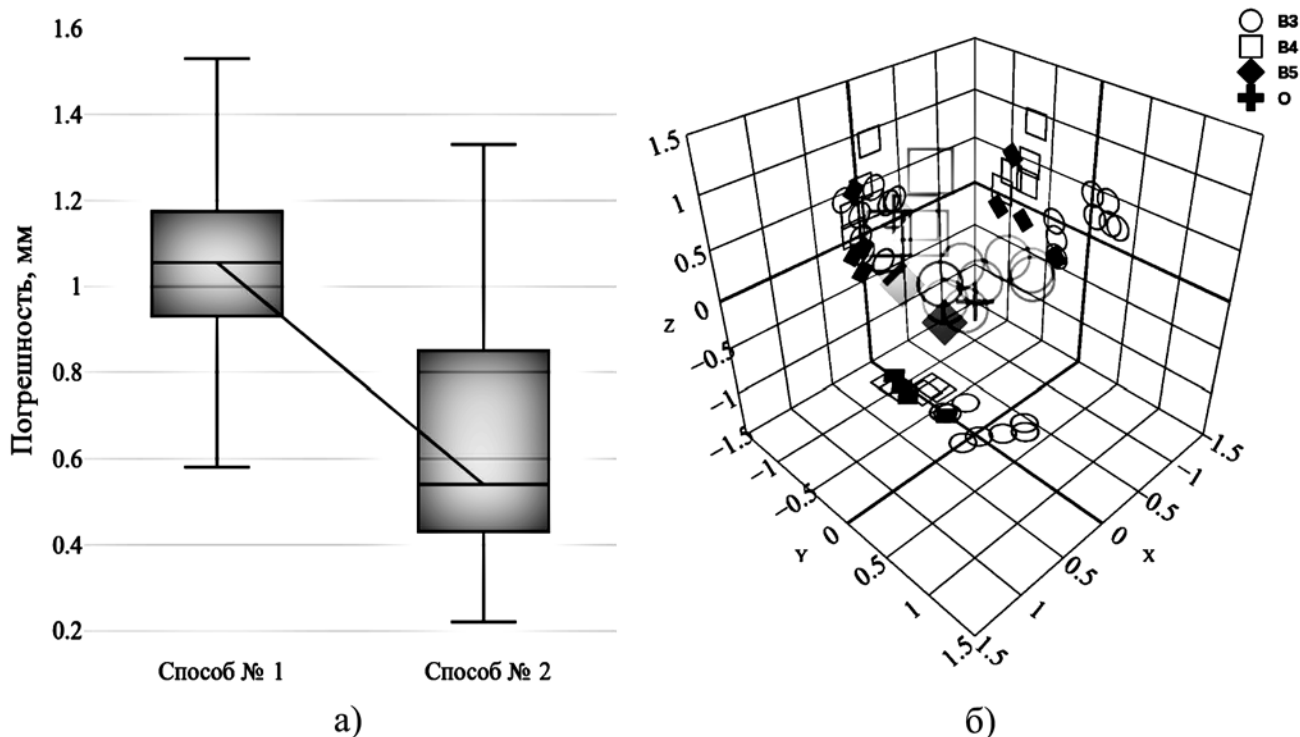


Рис. 4. Точностные характеристики исследуемых способов стереотаксического наведения: а) диаграмма размаха, отражающая медиану погрешности и диапазон стандартного отклонения при использовании двух способов стереотаксического наведения; б) график погрешности наведения по трем координатным осям с использованием способа № 2 (большие геометрические фигуры соответствуют положению кончика наведенного инструмента, маленькие – их проекции на координатные плоскости; В3, В4, В5 – промаркированные отверстия в крышке фантома, отражающие положение камер системы нейронавигации в пространстве операционной в момент проведения эксперимента; О – начало координат, соответствующее положению стереотаксической мишени)