

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ МЕДИЦИНСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ «НЕЙРОПЛАН» ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ ВМЕШАТЕЛЬСТВ

И. В. Архипов¹, Е. М. Михайлов², Д. Д. Долотова¹, Д. Е. Закондырин³,
А. В. Гаврилов⁴, А. И. Лейченко¹, В. В. Крылов^{3,5}, А. Ю. Дмитриев⁵

¹ООО «Гаммамед-Софт»; Россия, 127473 Москва, ул. Краснопролетарская, 16, стр. 1;

²ООО «Гаммамед-Импекс»; Россия, 127048 Москва, ул. Октябрьская, 4, стр. 2;

³Клинический медицинский центр ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России; Россия, 111398 Москва, ул. Кусковская, владение 1а, стр. 4;

⁴лаборатория медицинских компьютерных систем Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцина Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова; Россия, 119991 Москва, Ленинские горы, д. 1., стр. 58;

⁵ГБУЗ «Научно-исследовательский институт скорой помощи им. Н. В. Склифосовского Департамента здравоохранения г. Москвы»; Россия, 129090 Москва, Большая Сухаревская пл., 3

Контакты: Дмитрий Евгеньевич Закондырин russiandoctor@mail.ru

Данное исследование посвящено изучению точности отечественной оптической навигационной системы «Нейроплан». С целью оценки комплексной погрешности системы была разработана пластиковая модель черепа с установленными в нее 8 рентгеноконтрастными точками-мишенями. В исследовании участвовали 12 врачей-нейрохирургов с различным уровнем профессиональной подготовки. Дизайн исследования предусматривал выполнение каждым врачом регистрации в системе «Нейроплан» при различных положениях модели с последующим попаданием в точки-мишени. Для выбора оптимального способа регистрации при различных положениях пациента на операционном столе использовались варианты регистрации по анатомическим ориентирам (от 3 до 7) и по поверхности. Анализ полученных результатов показал высокую точность оптической навигационной системы «Нейроплан»: при положении модели черепа на боку ошибка попадания в мишени в среднем составила 1,57 [1, 11; 2, 13] мм, а при положении лицевой стороной вниз – 1,69 [1, 26; 2, 19] мм, что сопоставимо с заявленной точностью зарубежных аналогов. При повторном проведении эксперимента было показано, что система обладает высокой ретестовой надежностью.

Ключевые слова: оптическая навигационная система, компьютерная навигация, нейрохирургия

Для цитирования: Архипов И. В., Михайлов Е. М., Долотова Д. Д. и др. Оценка точности оптической медицинской навигационной системы «Нейроплан» при моделировании нейрохирургических вмешательств. Нейрохирургия 2018;20(4):104–113.

DOI: 10.17650/1683-3295-2018-20-4-104-113

Evaluation of accuracy of medical optical navigation system “Neuroplan” for modeling of neurosurgical interventions

I.V. Arhipov¹, E.M. Mikhaylov², D.D. Dolotova¹, D.E. Zakondyrin³, A.V. Gavrilov⁴, A.I. Leychenko¹, V.V. Krylov^{3,5}, A.Yu. Dmitriev⁵

¹Gammamed-Soft, Ltd; Build. 1, 16 Krasnoproletarskaya St., Moscow 127473, Russia;

²Gammamed-Impex, Ltd; Build. 2, 4 Oktyabrskaya St., Moscow 127018, Russia;

³Clinical Medical Center, A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Ministry of Health of Russia; Build. 4, 1a Kuskovskaya St., Moscow 411398, Russia;

⁴Laboratory of Medical Computing System, D.V. Skobel'syn Institute of nuclear physics, Lomonosov Moscow State University; Build. 58, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia;

⁵N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine, Moscow Healthcare Department; 3 Bol'shaya Sukharevskaya Sq., Moscow 129090, Russia

This study is devoted to the accuracy of the optic navigation system “Neuroplan”. To assess the complex error of the system, a plastic model of the skull with 8 radiocontrast target points was developed. Twelve neurosurgeons with different levels of training participated in the study. The design of the study provided for each doctor performance of registration in the “Neuroplan” system at various positions of the model with subsequent hit at the target points. To select the optimal method of registration for different patient positions on the operating table, the registration table for anatomical landmarks (from 3 to 7) and on the surface was used. The analysis of the obtained results showed a high

accuracy of the optic navigation system “Neuroplan”: in the side position of the skull model the target error averaged 1.57 [1.11; 2.13] mm, in the face down position – 1.69 [1.26; 2.19] mm, which is comparable with the declared accuracy of foreign analogues. When the experiment was repeated, it was shown that the system has high retest reliability.

Key words: optic navigation system, computer navigation, neurosurgery

For citation: Arhipov I.V., Mikhaylov E.M., Dolotova D.D. et al. Evaluation of accuracy of medical optical navigation system “Neuroplan” for modeling of neurosurgical interventions. *Neyrokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2018;20(4):104–13.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к использованию в нейрохирургии навигационных систем неуклонно растет. По данным PubMed, количество публикаций о применении безрамной навигации с середины 80-х годов прошлого века постоянно увеличивается. Прослеживается тенденция к более широкому использованию безрамной навигации – как более удобной и позволяющей хирургу ориентироваться на привычные для него изображения: рентгенограммы, компьютерные и магнитно-резонансные томограммы (image-guided neurosurgery).

В настоящее время в России используются исключительно зарубежные навигационные системы, характеризующиеся высокой стоимостью покупки и сопровождения. Обучение нейрохирургов работе с подобными системами происходит либо непосредственно в условиях операционной, либо в ходе мастер-классов, организуемых на базе ведущих зарубежных клиник. С 2016 г. группой компаний «Гаммамед» при участии лаборатории медицинских компьютерных систем Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцина Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (проект № 26048) ведется разработка российской оптической навигационной системы «Нейроплан», предназначенной для выполнения нейрохирургических вмешательств. Медицинским соисполнителем данной разработки стал Клинический медицинский центр ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А. И. Евдокимова» Минздрава России. Испытания показали низкий уровень заводской погрешности системы (не более 0,3 мм). Однако для внедрения навигационной системы в клиническую практику требуется организация дополнительной серии экспериментов, симулирующих ее использование при различных хирургических доступах и локализации патологических образований.

Изучение точности навигации с использованием компьютерных систем в условиях, приближенных к клиническим, является темой ряда научных работ.

Ранее, в 2009 г., мы использовали пластиковую модель головы человека с установленными в полости черепа мишенями и навигационную систему Stryker. Экспериментальным путем определяли оптимальный способ регистрации модели, обеспечивающий полу-

чение минимальной ошибки попадания в мишень. Анализ результатов показал, что наибольшая точность наблюдается при комбинированном использовании в качестве опорных точек кожных меток и анатомических ориентиров, а при операциях на супратенториальных структурах – при использовании для регистрации минимум 5 анатомических ориентиров, не расположенных в одной плоскости [1].

При выборе метода регистрации по анатомическим ориентирам спорным остается вопрос об их необходимом количестве. P.A. Woerdemann и соавт. (2007) рекомендуют при интракраниальных вмешательствах использовать для регистрации от 5 до 8 анатомических точек: верхненосовую точку (*nasion*), медиальный и латеральный углы глаз, завиток, кончик носа, губной желобок (*philtrum*) [2]. R.R. Shamir и соавт. (2011) при имплантации вентрикулярного катетера под контролем навигационной системы используют для регистрации пациента 10 анатомических ориентиров [3]. Z.M. Samakkody и соавт. (2016) считают, что для трансназальных вмешательств на околоносовых пазухах и основании черепа достаточно регистрации по 3–4 анатомическим ориентирам: перегородке преддверия носа (*columella*), надпереносью (*glabella*), латеральным углом глаз – по типу буквы «Т» [4].

Большинство исследований посвящены сравнению точности навигирования различных способов регистрации: по анатомическим ориентирам (anatomical landmarks), по поверхности (surface matching), по адгезивным кожным меткам (scalp fiducials), с использованием лицевой маски (auto-registration mask) и введенных в кости черепа мини-винтов (bone fiducials). Одни работы представляют собой ретроспективный анализ клинического опыта [2, 5], другие являются анатомическими лабораторными исследованиями [6, 7]. Все авторы сходятся во мнении, что применение маркеров (fiducials) на коже или кости позволяет достичь большей точности позиционирования, чем регистрация по анатомическим ориентирам или по поверхности. A. Salma и соавт. (2012) отмечают, что имеет значение расположение мишени: при поверхностном (внечерепном) расположении большую точность обеспечивает регистрация по поверхности, а при глубоком (внутричерепном) – регистрация по маркерам [7]. T.R. Smith и соавт. (2014) экспериментально доказали, что при регистрации с использованием маркеров на точность попадания в мишень влияет не последовательность

регистрации точек, а их расположение на черепе относительно конкретной мишени [8].

Таким образом, проблема выработки оптимального алгоритма регистрации и определения точности навигационных систем остается актуальной. **Целью** данного **исследования** стало изучение зависимости точности навигационной системы «Нейроплан» от условий регистрации и опыта нейрохирургов, а также разработка алгоритма регистрации в зависимости от положения пациента и локализации мишеней.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание оптической навигационной системы «Нейроплан». Это интраоперационная система позиционирования пациента и хирургических инструментов под визуальным контролем, предназначенная для проведения малоинвазивных вмешательств в нейрохирургии и травматологии. Она связывает свободно перемещаемый хирургический инструмент, положение которого отслеживается с помощью оптической системы, регистрирующей сигналы пассивных маркеров, с виртуальным пространством, которое сформировано на основе предоперационных изображений пациента, обработанных медицинской рабочей станцией.

Система навигации «Нейроплан» включает блок управления, сенсорные мониторы для визуализации,

оптический блок, систему регистрации положения пациента и инструментов, зонд-указку, насадки с пассивными маркерами для идентификации хирургического инструмента или области оперативного вмешательства (рис. 1).

Описание пластиковой модели головы с мишенями. С целью оценки точности навигационной системы «Нейроплан», а также отработки алгоритма регистрации пациента в системе навигации, на модели черепа установили пластиковые блоки высотой 1 и 3 см, на верхнем конце которых были закреплены рентгеноконтрастные метки диаметром 1,5 мм. Расположение блоков соответствовало топографии анатомических структур, в области которых чаще всего выполняют нейрохирургические вмешательства. Всего установили 8 блоков с закрепленными на них мишенями (рис. 2a).

1. Мишени передней черепной ямки.

1.1. Площадка клиновидной кости (высота блока 1 см) – мишень 1.

1.2. Латеральные отделы крыла клиновидной кости (высота блока 1 см) – мишень 2.

1.3. Белое вещество лобной доли (высота блока 3 см) – мишень 4.

2. Мишени средней черепной ямки.

2.1. Дно средней черепной ямки (высота блока 1 см) – мишень 3.



Рис. 1. Оптическая медицинская навигационная система «Нейроплан». 1 – оптический блок; 2 – блок управления с сенсорными мониторами; 3 – набор инструментов

Fig. 1. Medical optical navigation system “Neuroplan”. 1 – optical block; 2 – control panel with sensor monitors; 3 – instrument set

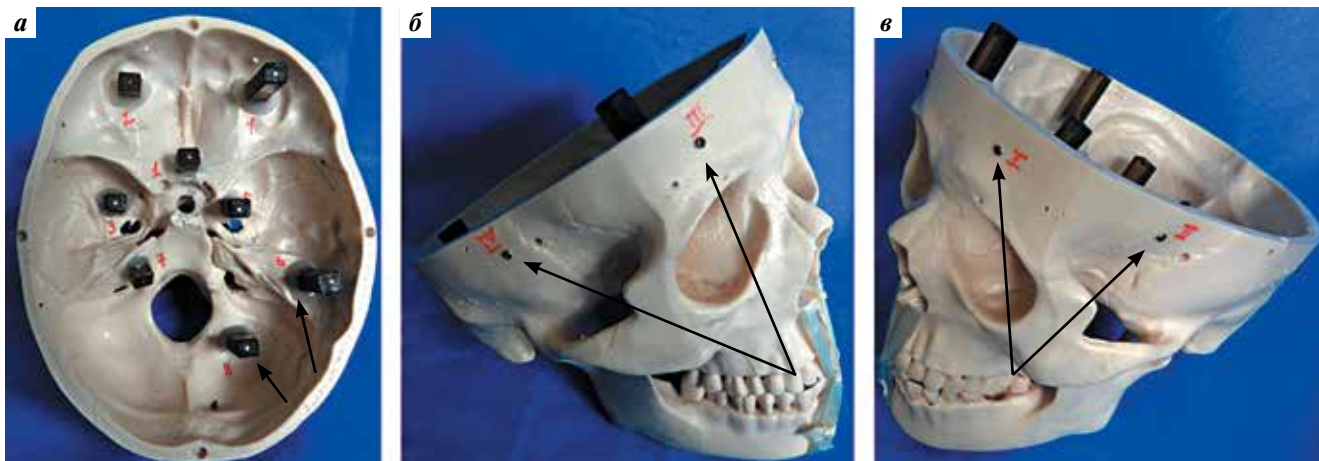


Рис. 2. Модель черепа с блоками, на которых установлены рентгеноконтрастные метки (стрелки): а – мишени; б, в – маркеры качества
Fig. 2. Skull model with blocks with X-ray markers (arrows): a – targets; б, в – quality markers

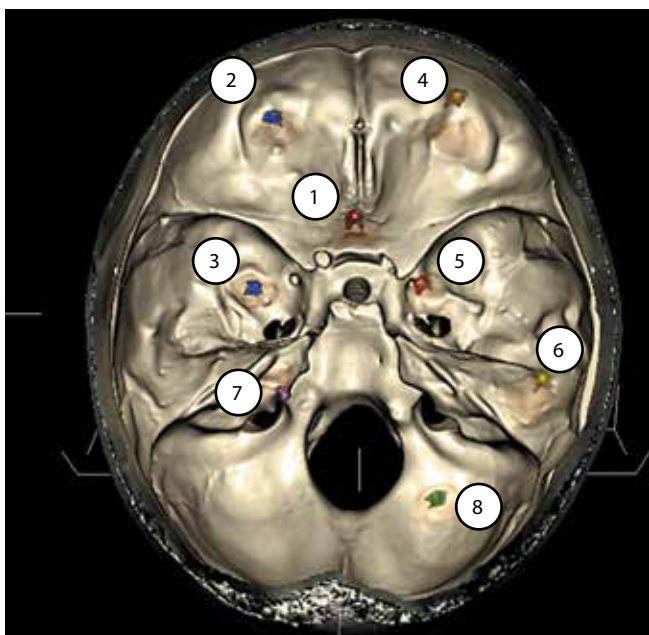


Рис. 3. Трехмерная реконструкция и сегментация мишеней. 1 – площадка клиновидной кости; 2 – латеральные отделы крыла клиновидной кости; 3 – дно средней черепной ямки; 4 – белое вещество лобной доли; 5 – область бокового желудочка и базальных ганглиев; 6 – белое вещество теменной доли; 7 – внутренний слуховой проход; 8 – белое вещество полушария мозжечка

Fig. 3. 3D reconstruction and target segmentation. 1 – sphenoid plate; 2 – lateral part of the sphenoid bone wings; 3 – middle cranial fossa floor; 4 – white matter of the frontal lobe; 5 – area of the lateral ventricle and basal ganglia; 6 – white matter of the parietal lobe; 7 – internal auditory pathway; 8 – white matter of the cerebellar hemisphere

- 2.2. Область бокового желудочка и базальных ганглиев (высота блока 3 см) – мишень 5.
- 2.3. Белое вещество теменной доли (высота блока 3 см) – мишень 6.
- 3. Мишени задней черепной ямки.
 - 3.1. Внутренний слуховой проход (высота блока 1 см) – мишень 7.



Рис. 4. Фиксация модели черепа в скобе Мейфилда
Fig. 4. Fixation of the skull model in the Mayfield clamp

3.2. Белое вещество полушария мозжечка (высота блока 3 см) – мишень 8.

После завершения регистрации модели черепа оценивали точность совмещения пластиковой модели и ее виртуальной реконструкции путем оценки величины их расхождения в области дополнительных рентгеноконтрастных меток (маркеров качества). Для этого на наружной поверхности черепа закрепили 6 титановых мини-винтов (рис. 2б, в).

После этого модель подвергли рентгеновской компьютерной томографии. Настройки полученных изображений в формате DICOM (яркость и контрастность для мультипланарных реконструкций, порог интенсивности для трехмерной реконструкции) были отрегулированы таким образом, чтобы мишени были хорошо визуализированы (рис. 3).

Для выполнения серии экспериментов модель зафиксировали в скобе Мейфилда с прикрепленной к ней референсной рамкой (рис. 4).

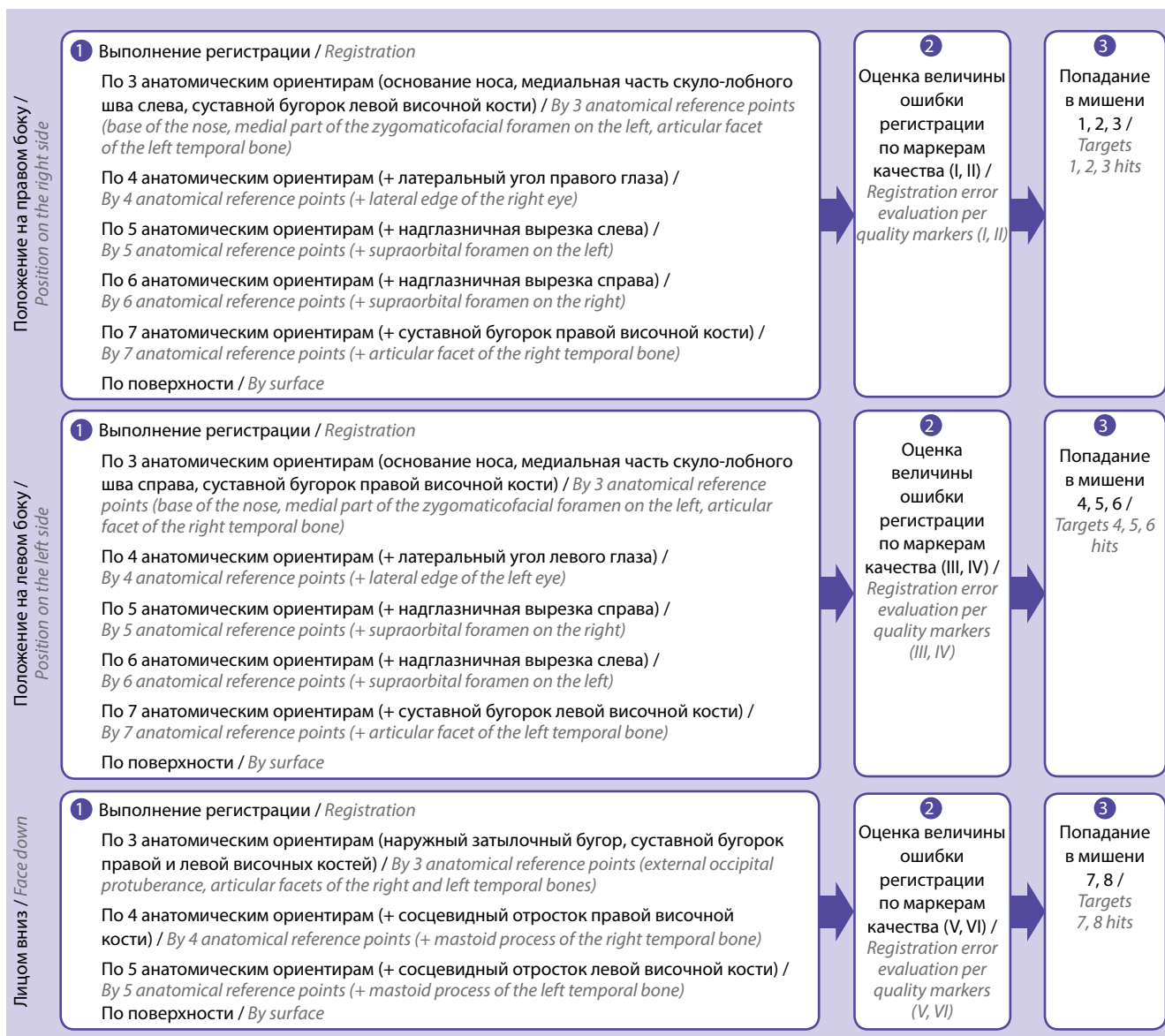


Рис. 5. Дизайн исследования

Fig. 5. Study design

Дизайн исследования. В исследовании участвовали 12 нейрохирургов с разным уровнем подготовки: 5 ординаторов, 2 врача с минимальным опытом работы (стажем менее 1 года), 5 врачей со стажем работы 3 и более года. Дизайн исследования предусматривал проведение серии экспериментов: при 3 различных положениях модели черепа каждый врач выполнял регистрацию модели в навигационной системе (с помощью анатомических ориентиров и алгоритма регистрации по поверхности черепа), далее оценивали регистрацию по 2 маркерам качества, после чего врач с помощью зонда указывал расположение мишени в полости черепа (рис. 5).

При каждой попытке попадания в мишень регистрировали величину комплексной ошибки навига-

ции, то есть расстояние от точки попадания до мишени, которое, по оценке навигационной системы, осталось непройденным и которое наблюдалось на мониторе. Для оценки ретестовой надежности системы каждый врач выполнял эксперимент дважды, после чего проводили сравнительный анализ величин ошибок при 1-й и 2-й попытках. Таким образом, в ходе исследования были собраны данные о 384 попытках регистрации модели в навигационной системе, а также о 1056 попытках попадания в точки-мишени.

Статистическая обработка. Анализ результатов включал проверку распределения величин ошибок регистрации и ошибок попадания в мишени с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. Так как применение критерия показало отличие распределения

от нормального закона, для описания использовались значения медианы, 1-го и 3-го квартилей ($Me [Q_1; Q_3]$), а при дальнейшем сравнении групп – методы непараметрической статистики. Сравнение независимых групп было выполнено с помощью критерия Манна–Уитни, оценка изменения величин в связанных группах – с помощью критерия Вилкоксона. Оценка ретестовой надежности проводилась путем вычисления коэффициента корреляции Спирмена. Для визуального представления результатов были построены диаграммы типа «ящик с усами» (box-and-whiskers diagram), на которых верхняя и нижняя граница «ящика» соответствовала 1-му и 3-му квартилю, черта посередине «ящика» – медиане, «усы» – минимальному и максимальному значениям. Пороговый уровень значимости при проверке статистических гипотез принимался равным 0,05. Статистическая обработка результатов была выполнена с помощью пакета прикладных программ IBM SPSS Statistics 21.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ошибки регистрации. Величина ошибки регистрации модели в системе навигации оценивалась с помощью маркеров качества. В ходе исследования было показано, что выбор расположения маркеров качества играет важную роль в процессе навигации: наибольшая корреляция величины ошибки регистрации и величины ошибки попадания в мишени наблюдалась для маркеров качества, наиболее близко расположенных

к соответствующим мишеням. При положении модели черепа на боку минимальная ошибка регистрации была характерна для способа регистрации по 6 анатомическим ориентирам (1,29 [0,91; 1,71] мм), при моделировании положения «лицом вниз» – при регистрации по 5 анатомическим ориентирам (2,20 [1,69; 2,94] мм) (рис. 6).

В результате этой серии экспериментов установлено, что при положении пациента на боку для получения достаточного качества регистрации необходимо использовать не менее 6 анатомических ориентиров. При положении «лицом вниз» наилучшие результаты дал способ регистрации по 5 анатомическим ориентирам, однако статистически значимых различий по сравнению с другими вариантами обнаружено не было. В связи с этим для обоснования выбора способа регистрации провели анализ величин ошибок попадания в мишени, наблюдаемых при каждом способе регистрации.

Ошибки попадания в мишени. В ходе моделирования оперативного вмешательства, выполняемого при положении модели черепа на правом или левом боку, наименьшие ошибки наблюдались при регистрации по 6 анатомическим ориентирам (см. табл.). Для положения модели «лицом вниз» оптимальным был способ регистрации по поверхности.

При регистрации по 7 анатомическим ориентирам в большинстве случаев было отмечено увеличение размера ошибки, что, вероятно, было обусловлено

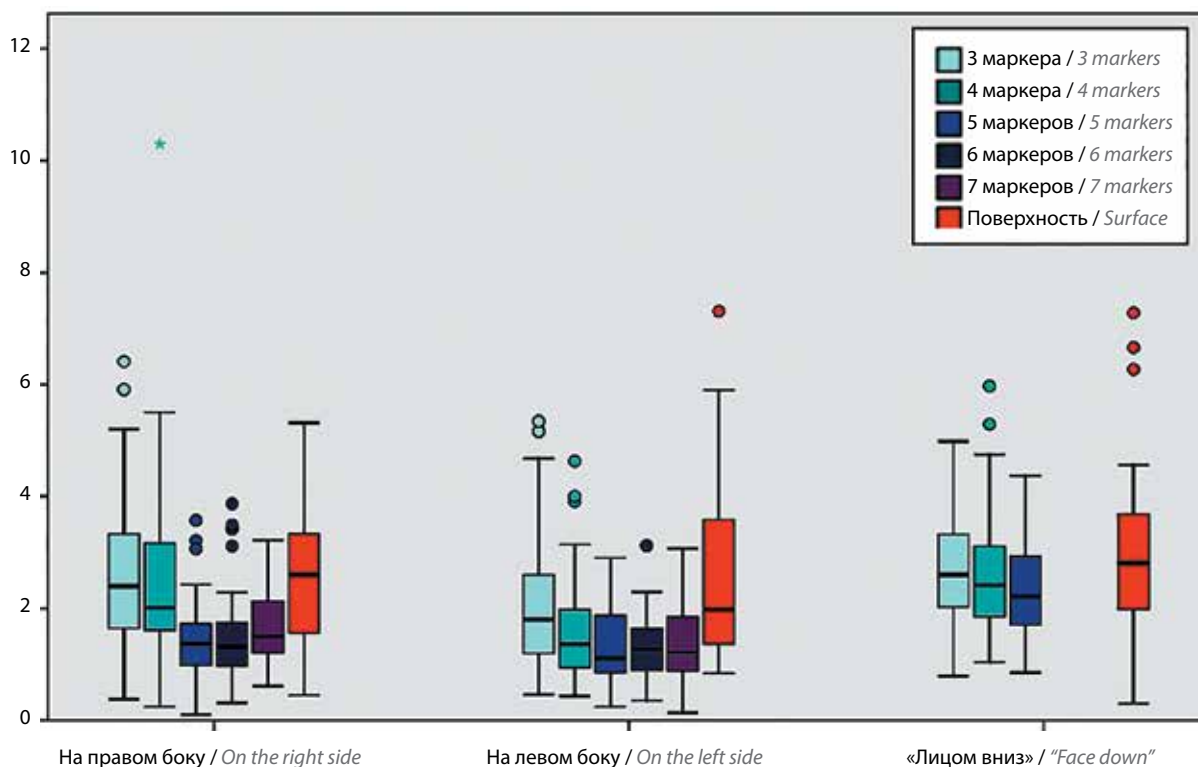


Рис. 6. Величина ошибки регистрации модели черепа в системе навигации при различных положениях на операционном столе и способах регистрации
Fig. 6. Error of skull model registration in the navigation system in different positions on the operating table and with different registration methods

Величина ошибки попадания в мишени при различных положениях макета головы и способах регистрации, Me [Q1; Q3], мм
Errors of target hitting in different positions of the head model and with different registration methods, Me [Q1; Q3], mm

Способ регистрации Registration method	Без учета положения Without accounting for position	При положении In position		
		на правом боку on the right side	на левом боку on the left side	ЛИЦОМ ВНИЗ face down
По 3 ориентирам For 3 reference points	2,63 [1,99; 3,26]	2,71 [2,12; 3,26]	2,85 [2,14; 3,92]	2,05 [1,36; 2,63]
По 4 ориентирам For 4 reference points	1,94 [1,34; 2,69]	1,82 [1,31; 2,83]	1,98 [1,35; 2,92]	2,01 [1,18; 2,59]
По 5 ориентирам For 5 reference points	1,76 [1,35; 2,51]	1,73 [1,05; 2,50]	2,00 [1,47; 2,39]	1,75 [1,47; 2,39]
По 6 ориентирам For 6 reference points	1,57 [1,11; 2,13]*	1,42 [0,99; 1,95]*	1,76 [1,22; 2,19]*	—
По 7 ориентирам For 7 reference points	1,82 [1,21; 2,20]	1,93 [1,27; 2,20]	1,77 [1,03; 2,20]	—
По поверхности	2,05 [1,40; 2,75]	2,10 [1,55; 2,95]	2,23 [1,38; 2,91]	1,69 [1,26; 2,19]*

*Жирным шрифтом отмечены минимальные значения ошибок.

*Minimal error values are shown in bold.

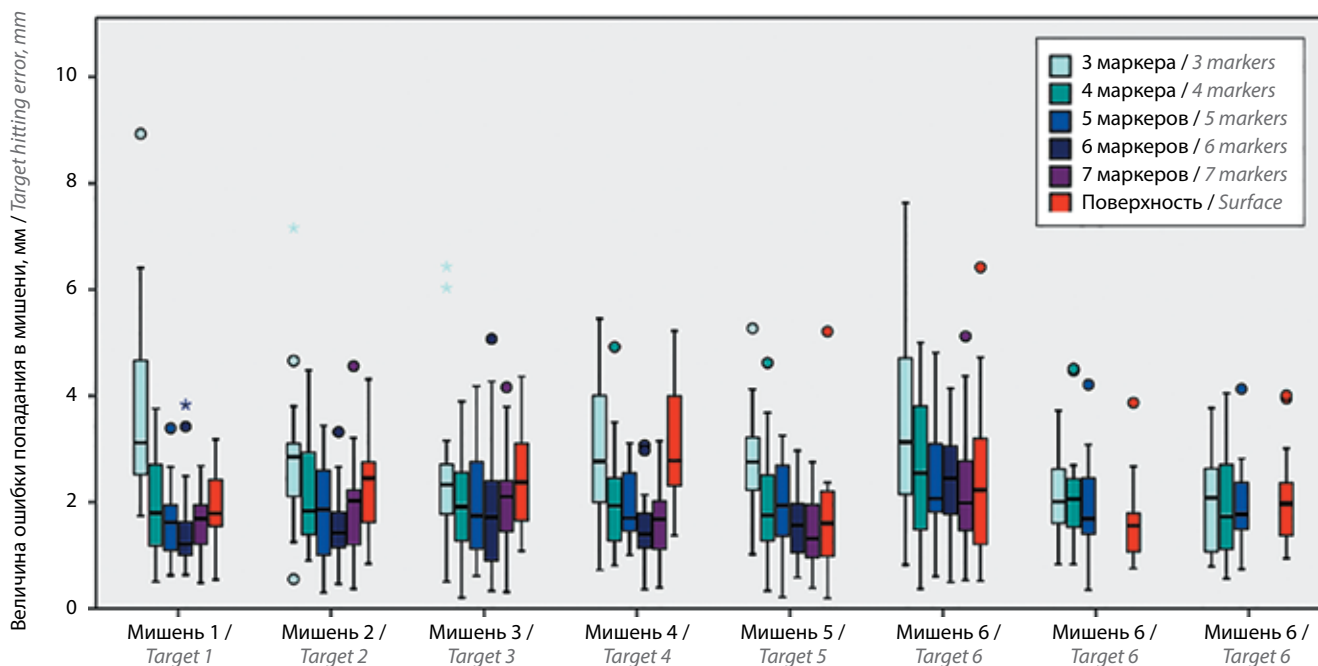


Рис. 7. Распределение величин ошибок попадания в мишени при различных способах регистрации

Fig. 7. Distribution of target hitting errors for different registration methods

возникшими у врачей техническими сложностями при указании суставного бугорка (*tuberculum articulare*) с контралатеральной стороны. Из рис. 7 видно, что для мишеней, находящихся в задней черепной ямке (7 и 8), оптимальна регистрация по поверхности. Это обусловлено главным образом сложностью поиска анатомических маркеров при положении пациента лицом вниз.

Вариации величин ошибок в зависимости от опыта врача. Изучение характера ошибок, фиксируемых при работе 12 нейрохирургов показало, что разброс величин ошибок попадания в мишени не зависел от их опыта. Врачи, у которых были зарегистрированы статистически значимо более высокие значения ошибок, встречались как среди ординаторов (2 из 5), так

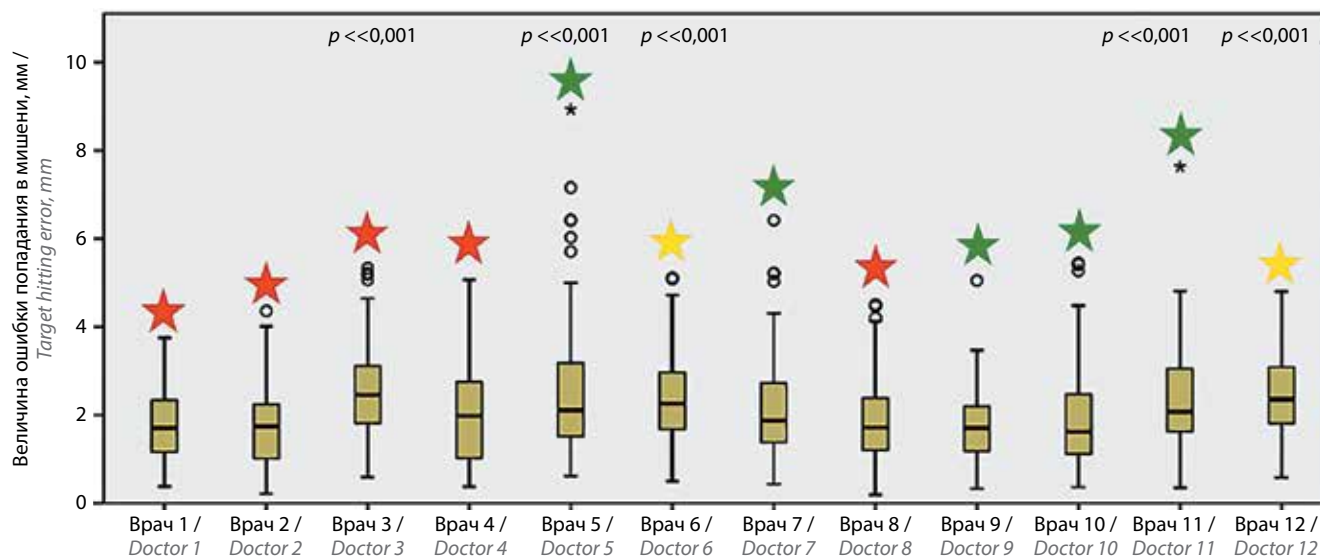


Рис. 8. Распределение величин ошибок попадания в мишени, сделанных 12 специалистами (без учета способа регистрации). Красными звездочками отмечены врачи со стажем 3 и более года, желтыми – врачи со стажем менее 1 года, зелеными – ординаторы

Fig. 8. Distribution of target hitting errors performed by 12 specialists (without accounting for registration method). Red stars denote doctors with more than 3 years of experience, yellow – doctors with less than 1 year of experience, green – residents

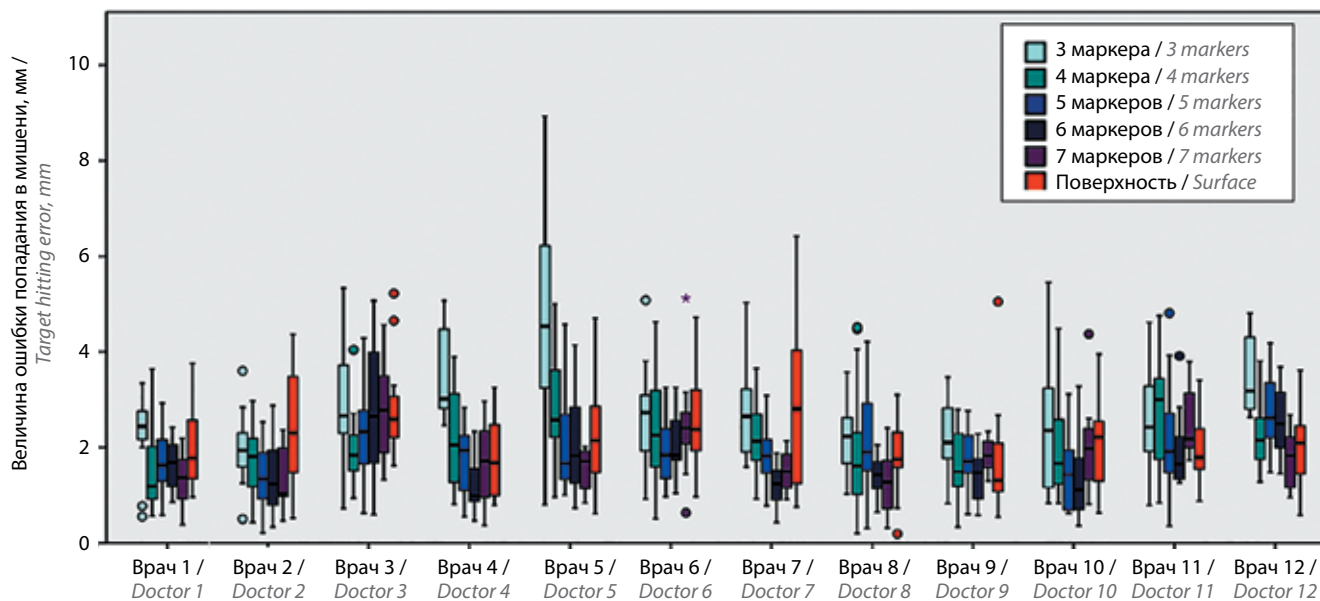


Рис. 9. Величина ошибки попадания в мишени при различных способах регистрации, примененных 12 нейрохирургами

Fig. 9. Target hitting errors made by 12 neurosurgeons using different registration methods

и среди хирургов со стажем работы 3 и более года (1 из 5) и с минимальным стажем (2 из 2) (рис. 8).

В некоторых случаях величина ошибки регистрации зависела от отношения врача к данной серии экспериментов.

Ошибки врачей при каждом способе регистрации модели представлены на рис. 9.

Анализ повторных измерений показал, что система характеризуется высокой ретестовой надежностью: величины ошибок регистрации и попадания в мише-

ни при 1-й и 2-й попытках каждого врача статистически значимо не различались, коэффициент корреляции для величин ошибок попадания в мишени при 1-й и 2-й попытках составил 0,85 ($p < 0,001$).

Важно понимать, что далеко не последним фактором, влияющим на точность навигации, является навык работы хирурга с навигационными системами. Для описания этого явления используются так называемые кривые обучения, отражающие динамику целевых показателей (точности, продолжительности операции,

частоты осложнений и др.) в процессе привыкания врача к новым технологиям. В зарубежной литературе неоднократно подчеркивалось, что величина ошибок определяется отнюдь не профессиональным опытом врачей (что согласуется с результатами нашего исследования) — она зависит от стажа их работы с навигационными системами [9]. Наша серия экспериментов была выполнена после однократной демонстрации работы системы, которая включала теоретическую и практическую части. Большинство участников экспериментов не использовало навигационные системы в рутинной клинической практике. Таким образом, полученные результаты соответствуют начальному участку кривых обучения, конечный вид которых планируется получить в ходе образовательного курса по использованию навигационной системы в нейрохирургии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная оптическая навигационная система «Нейроплан» демонстрирует точность навигации, достаточную для выполнения нейрохирургических вмешательств на головном мозге (в пределах 2 мм).

С целью формирования рекомендаций по выбору способа регистрации головы пациента была проведена

серия испытаний на пластиковой модели черепа, включающая несколько попыток регистрации при различных положениях модели, соответствующих классическим типам укладки пациента на операционном столе, а также при нескольких способах регистрации (по 3, 4, 5, 6, 7 анатомическим ориентирам и по поверхности). В результате установлено, что для регистрации головы пациента при его положении на боку оптимально использование 6 анатомических ориентиров, а при положении лицом вниз — использование регистрации по поверхности черепа.

Продemonстрировано, что величина ошибки попадания в мишени не зависит от опыта врача, а, вероятно, определяется его характерологическими особенностями и скрупулезностью подхода к регистрации модели. Сравнительный анализ нескольких попыток регистрации, выполненных одним и тем же хирургом, показал, что система «Нейроплан» характеризуется высокой ретестовой надежностью и показывает высокую повторяемость результатов регистрации модели головы по анатомическим ориентирам и по поверхности черепа. В дальнейшем планируется оценить влияние обучения нейрохирургов работе с навигационной системой на качество регистрации и точность попадания в мишени.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Крылов В.В., Шаклунов А.А., Булычева Е.Г. Различные типы ориентиров и определение их оптимального расположения при безрамной навигации. *Нейрохирургия* 2009;(2):13–22. [Krylov V.V., Shaklunov A.A., Bulycheva E.R. Different types of landmarks and determining their optimal location for frameless navigation. *Neurokhirurgiya = Russian Journal of Neurosurgery* 2009;(2):13–22. (In Russ.)].
2. Woerdemann P.A., Willems P.W., Noordmans H.J. Application accuracy in frameless image-guided neurosurgery: a comparison study of three patient-to-image registration methods. *J Neurosurg* 2007;106(6):1012–6. DOI: 10.3171/jns.2007.106.6.1012. PMID: 17564173.
3. Shamir R.R., Joskowicz L., Spektor S., Shoshan Y. Target and trajectory clinical application accuracy in neuronavigation. *Neurosurgery* 2011;68(1 Suppl Operative): 95–101. DOI: 10.1227/NEU.0b013e31820828d9. PMID: 21206305.
4. Samarakody Z.M., Abdullah B. The use of image guided navigational tracking systems for endoscopic sinus surgery and skull base surgery: a review. *Egyptian J Ear Nose Throat Allied Sci* 2016;17(30):133–7. DOI: 10.1016/j.ejenta.2016.07.005.
5. Willems P.W., Berkelbach van der Sprenkel J.W., Tulleken C.A.F. Comparison of adhesive markers, anatomical landmarks, and surface matching in patient-to-image registration for frameless stereotaxy. *Biomonit Endosc Tech* 2001;4:158 (Proceedings of SPIE): 156–63.
6. Schicho K., Figl M., Seemann R. et al. Comparison of laser surface scanning and fiducial marker-based registration in frameless stereotaxy. Technical note. *J Neurosurg* 2007;106(4):704–9. DOI: 10.3171/jns.2007.106.4.704. PMID: 17432726.
7. Salma A., Makiese O., Sammet S., Amirati M. Effect of registration mode on neuronavigation precision: an exploration of the role of random error. *Comput Aided Surg* 2012;17(4):172–8. DOI: 10.3109/10929088.2012.691992. PMID: 22681460.
8. Smith T.R., Mithal D.S., Stadler J.A. et al. Impact of fiducial arrangement and registration sequence on target accuracy using a phantom frameless stereotactic navigation model. *J Clin Neurosci* 2014;21(11):1976–80. DOI: 10.1016/j.jocn.2014.04.006. PMID: 24957630.
9. Hu X., Lieberman I.H. What is the learning curve for robotic-assisted pedicle screw placement in spine surgery? *Clin Orthop Relat Res* 2014;472(6):1839–44. DOI: 10.1007/s11999-013-3291-1. PMID: 24048889.

Вклад авторов

И.В. Архипов: разработка программного обеспечения навигационной системы, доработка системы под требования дизайна исследования;
Е.М. Михайлов: разработка аппаратного обеспечения навигационной системы, изготовление фантома;
Д.Д. Долотова: разработка дизайна исследования, анализ полученных данных, написание текста рукописи;
Д.Е. Закондырин: обзор публикаций по теме статьи, выполнение серий экспериментов, интерпретация результатов;
А.В. Гаврилов: разработка технического задания на создание навигационной системы, обзор публикаций по теме статьи;
А.И. Лейченко: редактирование текста статьи, анализ результатов;
В.В. Крылов: организация сбора данных, обсуждение и интерпретация результатов;
А.Ю. Дмитриев: получение экспериментальных данных.

Authors' contributions

I.V. Arhipov: development of navigation system software, improvement of the system to the requirements of the research design;
E.M. Mikhaylov: hardware development of the navigation system, the production of phantom;
D.D. Dolotova: developing the research design, analysis of the obtained data, article writing;
D.E. Zakondyrin: reviewing of publications of the article's theme, execution of a series of experiments, interpretation of the results;
A.V. Gavrilov: development of technical specifications for the creation of a navigation system, review of publications of the article's theme;
A.I. Leychenko: editing the text of the article, analysis of the results;
V.V. Krylov: organization of data collection, discussion and interpretation of results;
A.Yu. Dmitriev: obtaining experimental data.

ORCID авторов/ORCID of authors

И.В. Архипов/I.V. Arhipov: <https://orcid.org/0000-0003-4278-2285>
Е.М. Михайлов/E.M. Mikhaylov: <https://orcid.org/0000-0002-8443-5516>
Д.Д. Долотова/D.D. Dolotova: <https://orcid.org/0000-0002-5538-1109>
Д.Е. Закондырин/D.E. Zakondyrin: <https://orcid.org/0000-0002-0925-415>
А.В. Гаврилов/A.V. Gavrilov: <https://orcid.org/0000-0002-7838-584X>
А.И. Лейченко/A.I. Leychenko: <https://orcid.org/0000-0002-3026-6948>
В.В. Крылов/V.V. Krylov: <https://orcid.org/0000-0001-5256-0905>

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Работа была выполнена при поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (проект № 26048).

Financing. The study was performed with the support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (project No. 26048).