



Оригинальные исследования / Original research

Совмещение голографической модели и реального объекта при нейронавигации методом дополненной реальности (AR): анализ точности трех методов

Коновалов А.Н.^{1,2✉}, Артемьев А.А.¹, Окишев Д.Н.¹, Элиава Ш.Ш.¹, Иванов В.М.³, Смирнов А.Ю.³,
Князев А.В.⁴, Стрелков С.В.⁵

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, 4-я Тверская-Ямская ул., д. 16, Москва, Российская Федерация, 125047

²ФГАОУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Москва, Российская Федерация, 119991

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195251

⁴ООО «Нацстандарт-дистрибуция», ул. Вереysкая, д. 29, стр. 33, этаж 3, ком. 5, Москва, Российская Федерация, 121357

⁵ООО «Меджитал», ул. Лисичанская, 6, лит. А, пом. 14-н, ком. 2, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197342

Резюме

Введение. Технологии дополненной реальности (AR, augmented reality), позволяют хирургу накладывать трехмерные виртуальные модели на реальные объекты, улучшая визуализацию и облегчая выполнение сложных операций. Основной задачей использования AR в хирургии является точное совмещение виртуальной модели с реальной анатомией пациента, что позволяет хирургу видеть ключевые анатомические структуры в виде проекции на теле или внутри него.

Материалы и методы. При выполнении исследования были использованы HMD (head-mounted display) очки Microsoft HoloLens 2 и программное обеспечение «Меджитал» для AR-навигации. В статье представлены результаты технического сравнения трех методов совмещения AR 3D-моделей с головой пациента: совмещение по краниометрическим точкам, использование QR-кода и 3D-печатной рамки, а также применение заранее запрограммированных точек с 3D-указкой. Проведена оценка точности регистрации опорных точек через показатели FRE (fiducial registration error) и времени выполнения для каждого метода, что позволило определить их преимущества и ограничения.

Результаты. Среднее значение FRE при совмещении по краниометрическим точкам – $1,1 \pm 0,3$ см, при использовании QR-кода и 3D-напечатанной рамки – $0,4 \pm 0,3$ см, при применении заранее запрограммированных точек и 3D-указки – $0,7 \pm 0,6$ см. Время проведения совмещения в среднем составило 180, 5 и 100 с соответственно. Выявлено, что метод с использованием QR-кода и 3D-рамки обладает наибольшей точностью, что делает его предпочтительным для большинства клинических ситуаций.

Заключение. Каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор зависит от клинической ситуации, доступного оборудования и требуемой точности. Интеграция AR-технологий с хирургическими методами повышает безопасность и точность оперативных вмешательств.

Ключевые слова: дополненная реальность (AR), нейрохирургия, методы совмещения, краниометрические точки, QR-код, 3D-печать, HoloLens 2, интраоперационная навигация, нейронавигация, точность совмещения

Для цитирования: Коновалов А.Н., Артемьев А.А., Окишев Д.Н., Элиава Ш.Ш., Иванов В.М., Смирнов А.Ю., Князев А.В., Стрелков С.В. Совмещение голографической модели и реального объекта при нейронавигации методом дополненной реальности (AR): анализ точности трех методов. *Сибнейро*. 2025; 1(1): 26–36. <https://doi.org/10.64265/sibneuro-2025-1-1-26-36>

Вклад авторов

Коновалов А.Н. – разработка концепции, написание черновика рукописи, рецензирование и редактирование.

Артемьев А.А. – курирование данных, валидация результатов.

Окишев Д.Н. – формальный анализ.

Элиава Ш.Ш. – административное руководство проектом, научное руководство.

Иванов В.М. – получение финансирования.

Смирнов А.Ю. – проведение исследования, разработка программного обеспечения.

Князев А.В. – разработка методологии.

Стрелков С.В. – предоставление ресурсов, визуализация.

Конфликт интересов. Авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Статья подготовлена в рамках выполнения плана НИР по гранту РНФ «Внедрение технологий виртуальной и дополненной реальности в нейрохирургическую практику (номер проекта 23-75-01019).

Использование ИИ. При проведении исследования технологии искусственного интеллекта не использовались.

Доступность данных. Данные доступны по запросу к автору статьи, ответственному за переписку.

Поступила: 29.03.2025

Принята к печати: 27.07.2025

Опубликована: 15.10.2025

Alignment of the holographic model and the real object in neuronavigation using augmented reality (AR): accuracy analysis of three methods

Anton N. Konovalov^{1,2,✉}, Anton A. Artemyev¹, Dmitry N. Okishev¹, Shalva Sh. Eliava¹, Vladimir M. Ivanov³, Anton Yu. Smirnov³, Alexander V. Knyazev⁴, Sergey V. Strelkov⁵

¹N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery, 4-ya Tverskaya-Yamskaya str., 16, Moscow, Russian Federation, 125047

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University), Trubetskaya str., 8, building 2, Moscow, Russian Federation, 119991

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya str., 29, Saint Petersburg, Russian Federation, 195251

⁴Natsstandart-distributsia LLC, Vereyskaya str., 29, building 33, 3rd floor, room 5, Moscow, Russian Federation, 121357

⁵Medzhital LLC, Lisichanskaya str., 6A, facility 14-n, room 2, Saint Petersburg, Russian Federation, 197342

Abstract

Introduction. Augmented reality (AR) technologies allow a surgeon to overlay three-dimensional virtual models onto real objects, enhancing visualization and facilitating the performance of complex surgeries. The primary objective of using AR in surgery is the precise alignment of the virtual model with the patient's real anatomy, enabling the surgeon to see key anatomical structures as a projection onto or inside the body.

Materials and methods. The study utilized Microsoft HoloLens 2 HMD (head-mounted display) glasses and the "Medgital" software for AR navigation. This article presents the results of a technical comparison of three methods for aligning AR 3D models with a patient's head: alignment using craniometric points, the use of a QR code and a 3D printed frame and the application of pre-programmed points with a 3D pointer. The accuracy of fiducial point registration was assessed using the fiducial registration error (FRE) metric, and the execution time was measured for each method, allowing for the determination of their advantages and limitations.

Results. The mean FRE for alignment using craniometric points was 1.1 ± 0.3 cm, for the method using a QR code and a 3D printed frame it was 0.4 ± 0.3 cm, and for the method using pre-programmed points and a 3D pointer it was 0.7 ± 0.6 cm. The average alignment time was 180, 5, and 100 seconds, respectively. It was found that the method using the QR code and the 3D frame offered the highest accuracy, making it preferable for most clinical situations.

Conclusion. Each method has its own strengths and weaknesses; the choice depends on the clinical situation, available equipment, and required accuracy. The integration of AR technologies with surgical techniques improves the safety and precision of operative interventions.

Keywords: augmented reality (AR), neurosurgery, alignment methods, craniometric points, QR code, 3D printing, HoloLens 2, intraoperative navigation, neuronavigation, alignment accuracy

For citation: Konovalov A.N., Artemyev A.A., Okishev D.N., Eliava Sh.Sh., Ivanov V.M., Smirnov A.Yu., Knyazev A.V., Strelkov S.V. Alignment of the holographic model and the real object in neuronavigation using augmented reality (AR): accuracy analysis of three methods. *Sibneuro*. 2025; 1(1): 26–36. <https://doi.org/10.64265/sibneuro-2025-1-1-26-36>

Author contributions

Konovalov A.N. – conceptualization, writing – original draft, review and editing.

Artemyev A.A. – data curation, validation.

Okishev D.N. – formal analysis.

Eliava Sh.Sh. – project administration, supervision.

Ivanov V.M. – funding acquisition.

Smirnov A.Yu. – investigation, software development.

Knyazev A.V. – methodology.

Strelkov S.V. – resources, visualization.

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

Financial disclosure. This work was supported by the Russian Science Foundation, "Implementation of Virtual and Augmented Reality Technologies in Neurosurgical Practice", Grant number 23-75-01019.

Use of AI. No AI technologies were used in the research.

Data availability. The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Received: 29.03.2025

Accepted: 27.07.2025

Published: 15.10.2025

Введение

Дополненная (AR, augmented reality) и смешанная (MR, mixed reality) реальность становятся все более востребованными технологиями в хирургии, обеспечивая высокую точность и информативность в процессе проведения хирургических вмешательств [1, 2]. Эти технологии позволяют хирургу накладывать трехмерные виртуальные модели на реальные объекты, улучшая визуализацию и облегчая понимание и выполнение сложных операций. В нейрохирургии, где требуется высокая точность манипуляций, использование AR становится особенно важным, поскольку даже небольшие отклонения могут привести к серьезным последствиям [3].

Основной задачей при использовании AR в хирургии является точное совмещение виртуальной модели с реальной анатомией пациента. Это позволяет хирургу видеть ключевые анатомические структуры, такие как кровеносные сосуды, нервы или опухоли, в виде проекции на теле или внутри него [4, 5]. Совмещение моделей с реальными объектами не только улучшает визуализацию, но и способствует более безопасным манипуляциям за счет облегчения понимания пространственного расположения структур [6].

Одним из методов, активно исследуемых для достижения точного совмещения, является использование краниометрических точек – анатомических ориентиров на поверхности головы пациента, таких как брегма, назион, стефанион и другие. Этот метод обеспечивает высокую точность, поскольку эти точки легко доступны и могут быть точно измерены. Преимущество метода заключается в его прямом использовании анатомических ориентиров пациента, что позволяет точно соотнести виртуальную модель с реальными данными. Однако его недостатком является то, что процесс наложения зависит от точного определения точек вручную, что может увеличить время подготовки и допустить возможность человеческой ошибки [7].

Альтернативный метод совмещения основан на использовании QR-кодов и 3D-печатных рамок. Этот метод привлек внимание благодаря достижениям в области 3D-печати и компьютерной томографии (КТ). Рамка с QR-кодом фиксируется на голове пациента и включается в данные КТ. Это позволяет точно совместить 3D-модель с анатомическими

данными пациента и отслеживать положение головы в реальном времени. Преимущество этого метода заключается в автоматизации процесса совмещения и возможности отслеживания даже при изменении положения головы пациента, что особенно полезно в динамических условиях операции. Тем не менее, метод требует использования дополнительного выполнения КТ головы пациенту и возникает необходимость использования самой 3D-печатной рамки, что может усложнить процесс подготовки [8].

Третий метод, который также заслуживает внимания, основан на использовании заранее запрограммированных точек и 3D-указки. Этот подход позволяет хирургу интерактивно расставлять метки в пространстве с помощью AR-устройства, такого как шлем виртуальной реальности (HMD, head-mounted display) Microsoft HoloLens 2 (Microsoft Corp., США). После установки точек 3D-модель автоматически привязывается к ним, что обеспечивает высокую точность совмещения. Этот метод отличается тем, что он не требует заранее подготовленных ориентиров, таких как краниометрические точки или QR-коды, и может быть настроен хирургом непосредственно во время операции. Основное преимущество данного метода заключается в его гибкости и интерактивности, однако он требует более сложной настройки и дополнительного оборудования в виде ноутбука, точки доступа Wi-Fi (роутера) и синхронизированного подключения очков и компьютера к одному Wi-Fi соединению [9].

В то время как каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, существует общая потребность в разработке более быстрых и точных методов совмещения виртуальных моделей с анатомией пациента. Исследования показывают, что AR-технологии могут значительно повысить точность хирургических вмешательств и улучшить клинические результаты. Например, использование AR позволило сократить время операций и снизить риск повреждения критических анатомических структур [10].

Таким образом, целью данной статьи является сравнение трех методов совмещения 3D-моделей, выполненных с использованием методов дополненной реальности, с головой пациента с использованием HMD AR-навигации и оценка применения в контексте ней-

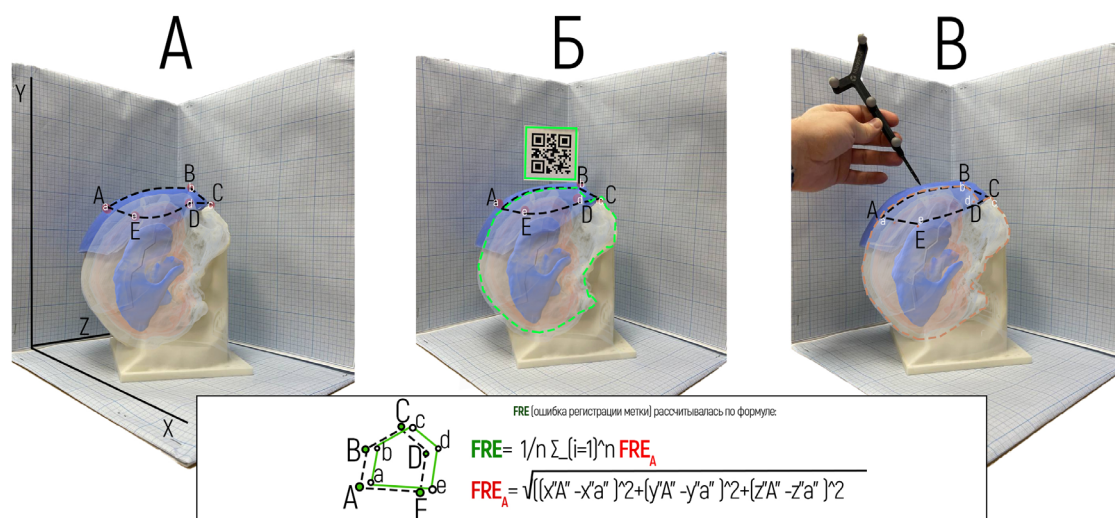


Рисунок 1. Исследование точности совмещения модели AR-методом расчета ошибки регистрации опорных точек (FRE, fiducial registration error) на фантоме, имитирующем голову пациента: А – метод наложения модели по краниометрическим точкам; Б – метод наложения модели с использованием QR-кода; В – совмещение по точкам с использованием 3D-указки и AR-станции. Источник: составлено авторами

Figure 1. Study of AR model alignment accuracy using the FRE (Fiducial Registration Error) calculation method on a phantom simulating a patient's head: А – model overlay method using craniometric points; Б – model overlay method using a QR code; В – point-based registration using a 3D pointer and an AR station.. Source: created by the authors

рохиургических операций. Это исследование поможет определить оптимальный метод для различных клинических сценариев.

Материалы и методы

Для исследования точности совмещения AR 3D-моделей с головой пациента мы использовали три различных метода (Рисунок 1): 1) совмещение по краниометрическим точкам; 2) совмещение с помощью QR-кода и 3D-напечатанной рамки; 3) совмещение по заранее запрограммированным точкам с использованием 3D-указки. Каждый из этих методов был протестирован с использованием специально разработанного фантома головы пациента, напечатанного на 3D-принтере, который позволял точно моделировать реальную анатомию и условия хирургического вмешательства.

Фантом головы пациента был изготовлен с использованием технологии 3D-печати методом послойного наложения (FDM, fused deposition modeling) на основе данных компьютерной томографии (КТ) реального пациента. Для создания фантома использовался медицинский 3D-принтер, который позволил точно воспроизвести анатомические структуры головы, включая кости черепа, мягкие ткани, а также ключевые анатомические ориентиры, такие как краниометрические точки (брегма, назион, стефанион, наружный слуховой проход). Материалом для печати

был выбран пластик, имитирующий плотность и физические свойства человеческой кости. Важной особенностью было наличие возможности крепления меток и рамки QR-кода на поверхность головы, что делало его пригодным для тестирования всех трех методов совмещения. Кроме того, благодаря сегментации данных КТ на фантоме были нанесены точные метки для последующего использования их в качестве контрольных точек в процессе совмещения виртуальных моделей с реальной поверхностью.

Метод 1: наложение модели по краниометрическим точкам

Первый метод, используемый для тестирования, основывался на совмещении виртуальной модели с поверхностью головы пациента через краниометрические точки (Рисунок 2). На фантоме головы пациента были выделены следующие ключевые анатомические ориентиры: брегма (точка на пересечении коронарного и сагиттального швов черепа), назион (точка пересечения носовых костей с лобной костью), стефанион (точка пересечения коронарного шва с височной линией), таргус (наружный слуховой проход), а также несколько других точек, известных как основные краниометрические ориентиры для хирургических процедур.

Перед началом процесса совмещения на фантоме вручную были отмечены эти точ-

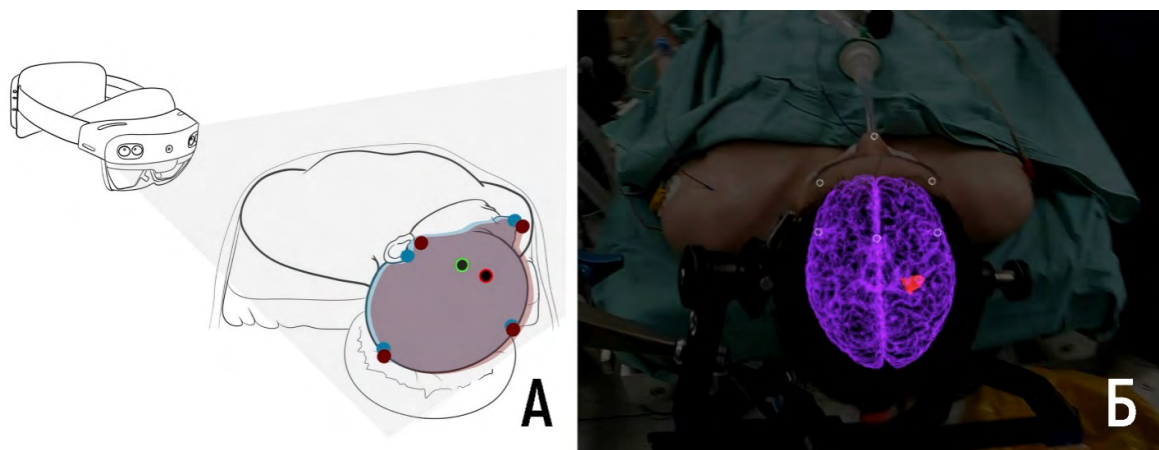


Рисунок 2. Совмещение 3D-модели с головой пациента по краниометрическим точкам: А – схематическое изображение; Б – клинический пример пациента с фокальной кортикальной дисплазией теменной доли (красный цвет), белые полупрозрачные сферы соответствуют расставленным краниометрическим точкам, визуализирована поверхность полушарий головного мозга (фиолетовый цвет). Источник: составлено автором

Figure 2. Alignment of a 3D model with the patient's head using craniometric points: A – schematic representation; B – clinical example of a patient with focal cortical dysplasia of the parietal lobe (shown in red). White translucent spheres correspond to the placed craniometric points. The surface of the cerebral hemispheres is visualized (purple). Source: created by the authors

ки с помощью цифрового измерительного инструмента и миллиметровой бумаги в трех плоскостях (x, y, z). Затем AR-очки, используемые в эксперименте, отображали виртуальную 3D-модель головы, которая содержала заранее сегментированные структуры черепа, мягких тканей и основных анатомических ориентиров. Совмещение модели с поверхностью головы фантома проводилось вручную, путём наложения виртуальных краниометрических точек на реальные ориентиры, отмеченные на фантоме.

В процессе совмещения оценивалась точность позиционирования через показатели ошибки регистрации опорных точек (FRE, fiducial registration error). FRE измерялась как среднее отклонение координат краниометрических точек на виртуальной модели от их реальных аналогов на поверхности фантома – всего 5 точек (Рисунок 1). Для каждого измерения выполнялось три повторных совмещения, после чего данные анализировались для оценки средней ошибки.

Метод 2: QR-код и 3D-напечатанная рамка

Во втором методе использовалась специальная 3D-напечатанная рамка с QR-кодом, которая крепилась на голову фантома для отслеживания положения и совмещения виртуальной модели с реальной поверхностью. Рамка была разработана таким образом, чтобы фиксироваться на голове за наружные слуховые проходы и назион, что обеспечивало ее стабильное положение относительно ос-

новных анатомических структур головы. QR-код, нанесенный на рамку, служил маркером для AR-очков, что позволяло точно отслеживать ее положение в пространстве (Рисунок 3).

Процесс совмещения начинался с КТ-сканирования головы фантома с установленной на нее рамкой. Полученные данные КТ использовались для построения сегментированной 3D-модели головы, включающей кости черепа, мягкие ткани и интракраниальные структуры. Затем серия DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) КТ с рамкой совмещается в программе с положением QR-кода в пространстве. После этого AR-очки, используя QR-код на рамке, автоматически совмещали виртуальную модель с реальной поверхностью фантома. Благодаря этому методу можно было отслеживать положение головы в реальном времени, что особенно полезно в ситуациях, когда пациент может изменять свое положение во время операции.

Метод 3: точки с использованием 3D-указки и AR-станций

Третий метод совмещения основывался на использовании заранее запрограммированных ключевых точек, которые устанавливались с помощью 3D-указки. AR-очки, используемые в эксперименте, отслеживали положение указки в реальном времени и позволяли хирургу или оператору интерактивно расставлять точки на поверхности фантома. Эти точки затем использовались для автоматического «притягивания» вир-

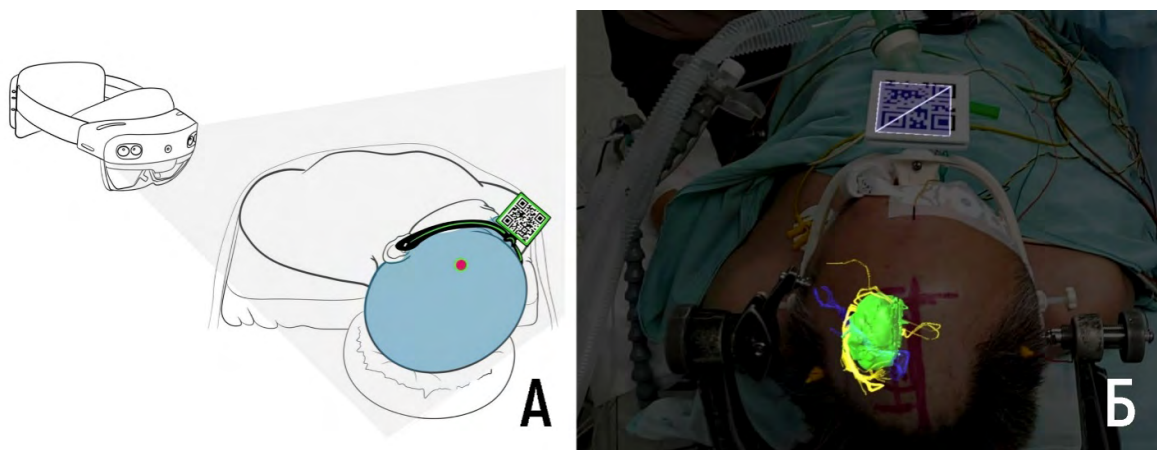


Рисунок 3. Совмещение 3D-модели с использованием QR-кода и 3D-напечатанной рамки: А – схематическое изображение; Б – клинический пример пациента с опухолью головного мозга, видна проекция объемной модели опухоли (зеленый цвет), пирамидного тракта (желтый цвет) и конвексимальной вены, впадающей в верхний сагиттальный синус (синий цвет). Источник: составлено автором

Figure 3. Alignment of a 3D model using a QR code and a 3D-printed frame: A – schematic representation; B – clinical example of a patient with a brain tumor. The projection of the volumetric model of the tumor (green), the pyramidal tract (yellow) and a convexital vein draining into the superior sagittal sinus (blue) are visible. Source: created by the authors

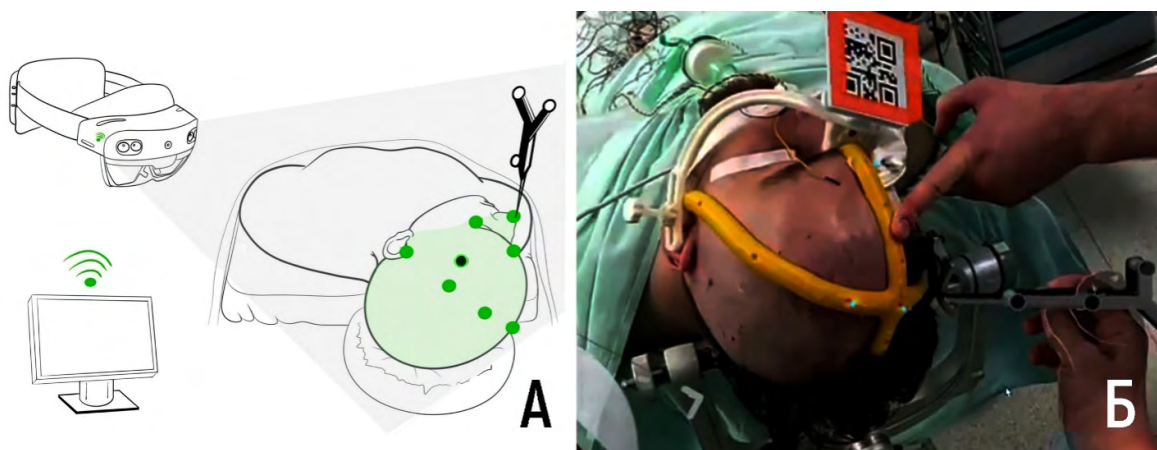


Рисунок 4. Совмещение 3D-модели по заранее запрограммированным точкам, расставленным с помощью 3D-указки: А – схематическое изображение; Б – клинический пример, этап расставления точек при помощи 3D-указки. Источник: составлено автором

Figure 4. Alignment of a 3D model using pre-programmed points placed with a 3D pointer: A – schematic representation; B – clinical example. The stage of placing points using a 3D pointer. Source: created by the authors

туальной 3D-модели головы к реальной поверхности (Рисунок 4).

Перед началом эксперимента в приложении были запрограммированы ключевые точки, соответствующие основным анатомическим ориентирам головы. С помощью 3D-указки оператор вручную расставлял эти точки на фантоме, при этом AR-очки отслеживали положение указки и накладывали виртуальные метки на реальную поверхность. После установки всех точек 3D-модель автоматически совмещалась с фантомом, что обеспечивало высокую точность совмещения. Точность совмещения оценивалась через показатели FRE аналогично другим методам.

Этот метод отличался высокой гибкостью, так как не требовал заранее подготовленных физических ориентиров, таких как краниометрические точки или QR-коды. Оператор мог самостоятельно выбирать и расставлять точки в зависимости от клинической ситуации или потребностей эксперимента. Однако метод требовал более сложной настройки и дополнительного оборудования, что могло увеличивать время подготовки.

Для точного определения пространственного положения (x, y, z) каждой краниометрической точки на фантоме использовалась следующая методика.

Фантом жестко фиксировался в стандартном анатомическом положении (франк-

фуртская горизонталь) относительно трех взаимно перпендикулярных плоскостей. Листы миллиметровой бумаги размещались вдоль каждой из трех основных плоскостей (сагиттальной, коронарной и аксиальной/горизонтальной), образующих систему координат. Бумага надежно крепилась к неподвижным подставкам или стенкам короба, в котором фиксировался фантом. С помощью анализа видео- и фотоизображений наложенных виртуальных моделей на реальный объект оператор рассчитывал положение каждой краниометрической точки на эти три плоскости: Координата X (верхне-нижняя, краниокаудальная) определялась по проекции точки на горизонтальную плоскость (горизонтальная миллиметровка). Координата Y (передне-задняя) определялась по проекции точки на сагиттальную плоскость (вертикальная миллиметровка). Координата Z (медиолатеральная) определялась по проекции точки на коронарную плоскость (вертикальная миллиметровка). Положение проекции точки на каждой плоскости фиксировалось по сетке миллиметровой бумаги с точностью до 1 мм. Значения x, y, z для каждой точки записывались вручную. Координаты (x''a'', y''a'', z''a''), полученные с помощью системы миллиметровой бумаги и цифрового измерительного инструмента, считались «реальными» или «истинными» координатами краниометрических точек на поверхности фантома. Этот набор данных служил эталоном для последующей оценки FRE. Оператор с помощью AR-очков совмещал виртуальную 3D-модель головы (содержащую свои виртуальные краниометрические точки с координатами x''A'', y''A'', z''A'') с фантомом, накладывая виртуальные точки на реальные одним из трех методов (Рисунок 1). Для оценки точности каждого из трех методов совмещения мы использовали показатели FRE. FRE определялась как среднее отклонение виртуальных координат опорных точек (краниометрических ориентиров, QR-кода или заранее расставленных точек) от реальных данных, измеренных на фантоме.

После совмещения для каждой из *n* (5 точек) краниометрических точек вычислялась FRE по формуле:

$$FRE_A = \sqrt{((x''A'' - x''a'')^2 + (y''A'' - y''a'')^2 + (z''A'' - z''a'')^2)},$$

где: x''A'', y''A'', z''A'' – координаты виртуальной точки в системе AR после совмещения;

x''a'', y''a'', z''a'' – «реальные» координаты соответствующей точки на фантоме, по-

лученные с помощью миллиметровой бумаги (эталон).

Затем рассчитывалось среднее значение FRE для всех точек:

$$FRE = 1/n \times \sum_{i=1}^n FRE_A.$$

Каждый метод был протестирован на одном и том же фантоме головы пациента. Для каждого метода проводились три повторных измерения, после чего вычислялось среднее значение ошибки и отклонений. Также в ходе эксперимента учитывалось время, затраченное на подготовку и выполнение совмещения, и оценивалось удобство использования каждого метода в условиях, имитирующих реальную операционную среду. Таким образом, данные эксперименты позволили оценить не только точность каждого из методов, но и время совмещения модели с реальным объектом.

Результаты

Показателем оценки точности была FRE. Кроме того, учитывалось время, необходимое для выполнения каждого из методов совмещения. Все полученные результаты приведены в таблице 1 и графически – на рисунке 5.

При использовании метода совмещения по краниометрическим точкам среднее значение FRE составило 1,1 см с отклонением 0,3 см, что свидетельствует о достаточно высоком уровне точности. Время, затраченное на проведение совмещения, было самым большим среди трех методов и составило в среднем 180 с. Это объясняется необходимостью ручного поиска и наложения точек на фантоме, что увеличивало общее время процедуры.

Данный метод показал относительно высокую точность при использовании краниометрических ориентиров, однако самую низкую среди трех методов. Также для этого метода максимально выражена ошибка параллакса ввиду того, что совмещение происходит за счет пользователя HMD-гарнитуры. Это приводит к тому, что визуально AR-модель накладывается на краниометрические точки с одного угла обзора и в двух плоскостях (например, x и y), что часто приводит к смещению положения в третьей плоскости (например, z). Главным преимуществом данного метода является его простота и то, что он может быть использован в экстренных ситуациях или в обстоятельствах ограниченных технических возможностей. Он обладает достаточной точностью для выполнения

Таблица 1. Сравнение точности и времени совмещения методов. Источник: составлено автором

Table 1. Comparison of the accuracy and registration time of the methods. Source: created by the authors

Методы	Требования	FRE (среднее отклонение, см)	Время совмещения (с)
Наложение модели по краниометрическим точкам	HMD-гарнитура	$1,1 \pm 0,3$	180 ± 15
QR-код и 3D-напечатанная рамка	HMD-гарнитура + 3D-рамка с QR-кодом + КТ головы с рамкой до операции	$0,4 \pm 0,3$	5 ± 10 (+ время на выполнение КТ головы с QR-рамкой)
3D-указка и программированные точки	HMD-гарнитура + AR-станция (ноутбук) + Wi-Fi точка (роутер) + QR-код (опционально)	$0,7 \pm 0,6$	100 ± 12

разметки перед операцией при большинстве нейрохирургических вмешательств, что делает данный метод универсальным и резервным.

Метод с использованием QR-кода и 3D-напечатанной рамки показал наилучшие результаты по точности совмещения. Среднее значение FRE составило 0,4 см с отклонением 0,3 см. Это говорит о высокой точности и надежности метода.

Время, затраченное на совмещение, было также достаточно коротким – 5 с, но было необходимо выполнение КТ-исследования пациента с QR-рамкой, что занимает в среднем 30 мин и требует определенной логистики выполнения исследования. Автоматизация процесса наложения и возможность отслеживания положения головы в реальном времени значительно снизили вероятность ошибок и упростили процесс совмещения. Метод оказался особенно полезным в ситуациях, когда положение головы может меняться во время операции. Мы рекомендуем этот метод для плановых нейрохирургических вмешательств. Метод может быть использован и в экстренных ситуациях при условии

доступа к КТ для выполнения исследования с QR-рамкой.

Третий метод, основанный на использовании заранее запрограммированных точек и 3D-указки, показал среднюю точность среди трех методов. FRE составила 0,7 см с отклонением 0,6 см. Время совмещения оказалось промежуточным – 100 с.

Этот метод представил достаточно высокую точность и гибкость в выборе точек для совмещения, что делает его полезным в условиях, когда нет возможности заранее определить анатомические ориентиры или использовать серию DICOM КТ для совмещения модели с QR-кодом. Такие ситуации могут возникать при операциях в положении лежа на животе у пациентов с краниальной патологией или у пациентов со спинальной патологией любой локализации. Однако требуется настройка оборудования для работы с 3D-указкой, что может затруднять его использование в экстренных случаях. Этот метод является компромиссным, имеющим достаточную точность, время совмещения, и обладает большим преимуществом ввиду наличия особых функций,

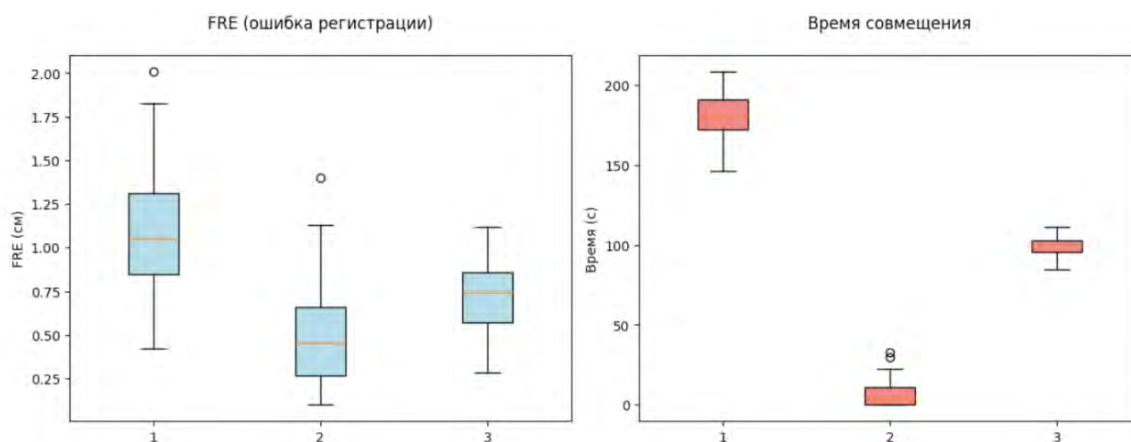


Рисунок 5. Сравнение методов совмещения по показателям FRE и времени совмещения. Примечание: 1 – краниометрические точки; 2 – QR-код и 3D-напечатанная рамка; 3 – 3D-указка и программированные точки. Источник: составлено авторами

Figure 5. Comparison of registration methods by FRE and registration time. 1 – craniometric points; 2 – QR code and 3D-printed frame; 3 – 3D pointer and pre-programmed points. Source: created by the authors

таких как отслеживание AR-инструментов со светооптическими маркерами, совмещение нескольких серий DICOM-изображений одновременно, высокая производительность за счет обработки 3D-изображений на AR-станции (компьютере с программным обеспечением для настройки и трансляции в HMD-гарнитуру). Это также открывает ряд перспектив для дальнейшего расширения функционала AR-навигации.

Обсуждение

Использование технологий дополненной реальности в нейрохирургии открыло новые горизонты для повышения точности операций и улучшения клинических исходов. В рамках нашего исследования мы рассмотрели три различных метода совмещения AR 3D-моделей с головой пациента, каждый из которых обладает своими преимуществами и ограничениями. Эти методы – совмещение по краниометрическим точкам, использование QR-кода и 3D-напечатанной рамки, использование заранее запрограммированных точек с использованием 3D-указки – продемонстрировали разные уровни точности и удобства применения, что важно учитывать при выборе подхода в зависимости от конкретной клинической ситуации.

Метод совмещения по краниометрическим точкам, включающий такие ориентиры, как брегма, назион и стефанион, продемонстрировал высокую точность в плане регистрации опорных точек (FRE). Однако ручной характер процесса и его зависимость от человеческого фактора оказывают значительное влияние на общее время выполнения и могут привести к непреднамеренным ошибкам. Этот метод требует времени для точного определения и установки краниометрических ориентиров, что может усложнять его применение в условиях, требующих быстрой настройки.

Согласно исследованию J.W. Yoon и соавт., использование краниометрических точек в нейрохирургии доказало свою эффективность при проведении навигации и совмещения анатомических структур, однако их точность может варьировать в зависимости от точности их идентификации на поверхности пациента [11]. Тем не менее, использование краниометрических точек продолжает оставаться актуальным, особенно в тех случаях, когда невозможно применить другие методы, такие как использование QR-кодов или заранее запрограммированных точек. Например, в операциях,

где доступ к другим структурам ограничен, данный метод может обеспечить достаточно высокую точность при условии тщательного выполнения. Важно отметить, что для повышения точности данного метода необходимы более автоматизированные подходы к идентификации и наложению краниометрических точек, что может сократить время подготовки и минимизировать риск ошибок.

Метод совмещения с использованием QR-кода и 3D-напечатанной рамки показал лучшие результаты по точности и времени выполнения. Среднее значение FRE составило 0,4 см, что значительно ниже по сравнению с другими методами. Это подтверждается исследованиями Н. Wang и соавт., которые показали, что использование внешних меток, таких как QR-коды, позволяет достичь высокой точности в реальном времени при выполнении сложных хирургических вмешательств [7]. В дополнение к этому автоматизация процесса совмещения позволяет минимизировать человеческий фактор, что особенно важно при работе с подвижными структурами, такими как голова пациента.

В нашем исследовании время на совмещение по этому методу составило всего 5 с, что делает его наиболее эффективным среди рассмотренных методов, если модель заранее подготовлена. Это особенно полезно в условиях, где время является критическим фактором, например, при экстренных хирургических вмешательствах. Возможность отслеживания положения головы пациента в реальном времени также обеспечивает дополнительную гибкость, так как даже при изменении положения головы совмещение остается точным.

Исследования, проведенные N. Mahmoud и соавт., также подтверждают, что использование AR с метками на основе QR-кодов является эффективным средством для визуальной навигации и контроля положения анатомических структур в пространстве [3]. Кроме того, данный метод может применяться не только в нейрохирургии, но и в других хирургических областях, таких как ортопедия и пластическая хирургия, где точное совмещение является ключевым фактором для успешного исхода операции.

Несмотря на высокую точность и эффективность метода с использованием QR-кодов, существуют некоторые ограничения, которые следует учитывать. Во-первых, необходимость использования дополнительных устройств, таких как 3D напечатанная рамка, может усложнять подготовку к операции, особенно в условиях, где доступ к 3D-печати

ограничен. Во-вторых, возможны ситуации, когда рамка может смещаться или деформироваться, что потребует повторной калибровки. Однако, учитывая общий результат, данный метод остается предпочтительным для большинства клинических ситуаций, где требуется высокоточное совмещение.

Третий метод совмещения, основанный на использовании заранее запрограммированных точек и 3D-указки, показал результаты, сопоставимые с методом QR-кодов, но с некоторыми важными отличиями. Среднее значение FRE составило 0,7 см, что находится на среднем уровне по сравнению с другими методами. Однако время выполнения совмещения оказалось несколько выше – в среднем 100 с. Это объясняется тем, что процесс требует предварительной настройки и расстановки точек с помощью 3D-указки, что увеличивает общее время процедуры.

Основное преимущество данного метода заключается в его гибкости. Оператор может самостоятельно выбирать и программировать точки для совмещения, что позволяет адаптировать метод под конкретную клиническую ситуацию. Например, в случаях, когда невозможно использовать QR-коды или краниометрические точки, метод с 3D-указкой может предоставить высокую точность без необходимости в дополнительных физических ориентирах. Исследования I. Kuhlemann и соавт. показали, что использование подобных указок в сочетании с AR-технологиями позволяет достичь высокой точности при операциях и не мешает ходу вмешательства [12].

Однако данный метод также имеет свои ограничения. Во-первых, сложность настройки и необходимость использования дополнительных устройств могут затруднить его внедрение в рутинную клиническую

практику. Во-вторых, требование к точности расстановки точек вручную оставляет место для человеческой ошибки. Тем не менее, в условиях, где другие методы не могут быть применены, использование заранее запрограммированных точек с 3D-указкой остается эффективным решением.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что метод с использованием QR-кодов и 3D-напечатанной рамки является наиболее точным и быстрым среди рассмотренных методов, что делает его предпочтительным для большинства клинических ситуаций. Однако выбор метода всегда должен основываться на конкретных условиях операции. В ситуациях, где важна гибкость и нет возможности использования QR-кодов или краниометрических точек, метод с 3D-указкой может предоставить необходимую точность и адаптивность. Совмещение по краниометрическим точкам, хотя и требует большего времени и является менее точным, может оставаться важным инструментом для операций, где доступ к другим методам ограничен.

Заключение

Каждый из методов имеет свои сильные и слабые стороны, и выбор подхода должен зависеть от клинического контекста, доступного оборудования и необходимой точности. Развитие AR-технологий и их интеграция с хирургическими методами предоставляют новые возможности для повышения точности операций, улучшения безопасности и сокращения времени вмешательства. Дальнейшие исследования и усовершенствование существующих методов совмещения могут сделать эти технологии более доступными и эффективными в нейрохирургической практике.

Литература / References

1. Kim Y, Kim H, Kim YO. Virtual reality and augmented reality in plastic surgery: A review. *Arch Plast Surg*. 2017; 44(3): 179-187. <https://doi.org/10.5999/aps.2017.44.3.179>
2. Azuma RT. *A survey of augmented reality*. Vol. 6. *Presence: Teleoperators and virtual environments*. 1997. doi.org: 10.1162/pres.1997.6.4.355
3. Mahmoud N, Grasa ÓG, Nicolau SA, Doignon C, Soler L, Marescaux J, et al. On-patient see-through augmented reality based on visual SLAM. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2017; 12(1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11548-016-1444-x>
4. Mitsuno D, Ueda K, Hirota Y, Ogino M. Effective application of mixed reality device HoloLens: Simple manual alignment of surgical field and holograms. *Plast Reconstr Surg*. 2019; 143(2): 647-651. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000005215>. Erratum in: *Plast Reconstr Surg*. 2019; 143(4): 1283. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000005770>
5. Lia H, Paulin G, Yi N, Haq H, Emmanuel S, Ludig K, et al. HoloLens in suturing training. *Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*. 2018: 69. <https://doi.org/10.1117/12.2293934>
6. Kilgus T, Heim E, Haase S, Prüfer S, Müller M, Seitel A, Fangerau M, et al. Mobile markerless augmented reality and its application in forensic medicine. *Int J Comput Assist Radiol Surg*. 2015; 10(5): 573-586. <https://doi.org/10.1007/s11548-014-1106-9>
7. Wang H, Wang F, Leong AP, Xu L, Chen X, Wang Q. Precision insertion of percutaneous sacroiliac screws using a novel augmented reality-based navigation system: A pilot study. *Int Orthop*. 2016; 40(9): 1941-1947. <https://doi.org/10.1007/s00264-015-3028-8>

8. Van Kreveld DWF, Poelman R. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *Int J Virtual Real.* 2010; 9(2): 1–20. <https://doi.org/10.20870/IJVR.2010.9.2.2767>
9. Badiali G, Ferrari V, Cutolo F, Freschi C, Caramella D, Bianchi A, et al. Augmented reality as an aid in maxillofacial surgery: Validation of a wearable system allowing maxillary repositioning. *J Cranio-maxillofac Surg.* 2014; 42(8): 1970–1976. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.09.001>
10. Tepper OM, Rudy HL, Lefkowitz A, Weimer KA, Marks SM, Stern CS, et al. Mixed reality with HoloLens: Where virtual reality meets augmented reality in the operating room. *Plast Reconstr Surg.* 2017; 140(5): 1066–1070. <https://doi.org/10.1097/PRS.0000000000003802>
11. Yoon JW, Chen RE, Kim EJ, Akinduro OO, Kerezoudis P, Han PK, et al. Augmented reality for the surgeon: Systematic review. *Int J Med Robot.* 2018; 14(4): e1914. <https://doi.org/10.1002/rcs.1914>
12. Kuhlemann I, Kleemann M, Jauer P, Schweikard A, Ernst F. Towards X-ray free endovascular interventions – Using HoloLens for on-line holographic visualisation. *Healthcare Technology Letters. Institution of Engineering and Technology.* 2017: 184–187.

Сведения об авторах / Information about the authors

Коновалов Антон Николаевич – кандидат медицинских наук, научный сотрудник, врач-нейрохирург 3-го нейрохирургического отделения (сосудистая нейрохирургия), ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, старший научный сотрудник Дизайн-центра гибкой биоэлектроники, ФГАУ ВО Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>; e-mail: ANKonovalev@nsi.ru.

Артемьев Антон Алексеевич – клинический ординатор, ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко» Минздрава России; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>; e-mail: Antonartemev13@yandex.ru

Окишев Дмитрий Николаевич – кандидат медицинских наук, научный сотрудник, врач-нейрохирург 3-го нейрохирургического отделения (сосудистая нейрохирургия), ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0815-5624>; e-mail: dokishev@nsi.ru

Элиава Шалва Шалвович – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник, врач-нейрохирург, заведующий 3-м нейрохирургическим отделением (сосудистая нейрохирургия), ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>; e-mail: eliava@nsi.ru

Иванов Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, кандидат технических наук, профессор Высшей школы теоретической механики и математической физики, ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>; e-mail: voliva@rambler.ru

Смирнов Антон Юрьевич – специалист Высшей школы теоретической механики и математической физики, ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2440-2499>; e-mail: ant.syur@gmail.com

Князев Александр Викторович – руководитель направления «Лучевая диагностика», ООО «Нацстандарт-дистрибуция»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>; e-mail: alexander.knyazev@mail.ru

Стрелков Сергей Васильевич – технический директор ООО «Меджитал»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>; e-mail: sergin3d2d@gmail.com

Anton N. Konovalev – Cand. Sci. (Med.), Researcher, Neurosurgeon of the 3rd Neurosurgical Department (Vascular Neurosurgery), N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery; Senior Researcher of the Design Center for Flexible Bioelectronics, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>; e-mail: ANKonovalev@nsi.ru.

Anton A. Artemyev – Clinical Resident, N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>; e-mail: Antonartemev13@yandex.ru

Dmitry N. Okishev – Cand. Sci. (Med.), Researcher, Neurosurgeon of the 3rd Neurosurgical Department (Vascular Neurosurgery), N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0815-5624>; e-mail: dokishev@nsi.ru

Shalva Sh. Eliava – Dr. Sci. (Med.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher, Neurosurgeon, Head of the 3rd Neurosurgical Department (Vascular Neurosurgery), N.N. Burdenko National Medical Research Center for Neurosurgery; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>; e-mail: eliava@nsi.ru

Vladimir M. Ivanov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Cand. Sci. (Tech.), Professor of the Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>; e-mail: voliva@rambler.ru

Anton Yu. Smirnov – Specialist of the Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2440-2499>; e-mail: ant.syur@gmail.com

Alexander V. Knyazev – Head of the «Radiation Diagnostics» Department, Natsstandart-distributsia LLC; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>; e-mail: alexander.knyazev@mail.ru

Sergey V. Strelkov – Technical Director, the Medgital LLC; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>; e-mail: sergin3d2d@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author