

Дополненная реальность как метод нейронавигации при микрохирургическом лечении цереброваскулярной патологии: описание метода и опыта применения

© А.Н. КОНОВАЛОВ^{1,2}, Д.Н. ОКИШЕВ¹, Ю.В. ПИЛИПЕНКО¹, Ш.Ш. ЭЛИАВА¹, А.А. АРТЕМЬЕВ², В.М. ИВАНОВ³, А.Ю. СМИРНОВ³, С.В. СТРЕЛКОВ⁴

¹ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия;

²ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва, Россия;

³ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Санкт-Петербург, Россия;

⁴ООО «Меджитал», Санкт-Петербург, Россия

Резюме

Применение дополненной реальности (от англ. augmented reality, AR) в микрохирургическом лечении цереброваскулярной патологии представляет собой перспективное направление, которое может существенно облегчить предоперационное планирование и интраоперационное понимание анатомии.

Цель исследования. Описать опыт использования нейронавигации методом AR при микрохирургическом лечении интракраниальных аневризм, артериовенозных мальформаций и каверном. Оценить точность и применимость нейронавигации методом AR.

Материал и методы. В исследовании приняли участие 22 пациента с церебральными аневризмами, артериовенозными мальформациями, наложением сосудистого экстра-интракраниального анастомоза и каверномами. Использовали HMD-очки Microsoft HoloLens 2 и программное обеспечение «Меджитал» для AR-навигации. Оценивались точность регистрации [ошибки целевой регистрации (Target Registration Error, TRE) и регистрации по меткам (Fiducial Registration Error, FRE)] и время на предоперационную подготовку.

Результаты. Среднее значение TRE при использовании QR-кода составило $0,6 \pm 0,2$ см, а при совмещении по краниометрическим точкам — $1,4 \pm 0,6$ см. Время на предоперационную обработку изображений составило $24,7 \pm 5,1$ мин, настройка приложения в операционной — $1,6 \pm 0,2$ мин. Использование метода совмещения с применением QR-кода обеспечило более высокую точность регистрации по сравнению с методом совмещения по краниометрическим точкам. AR-навигация улучшила визуализацию и планирование операций при аневризмах, артериовенозных мальформациях, создании микроанастомозов и кавернозных ангиомах.

Заключение. AR-навигация представляет собой инновационный метод, который имеет особые преимущества и потенциально может улучшить микрохирургическое лечение цереброваскулярной патологии. Необходимы дальнейшие исследования для подтверждения этих выводов и развития AR-технологии в нейрохирургии.

Ключевые слова: дополненная реальность, нейронавигация, сосудистая нейрохирургия.

Информация об авторах:

Коновалов А.Н. — <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

Окишев Д.Н. — <https://orcid.org/0000-0003-0815-5624>

Пилипенко Ю.В. — <https://orcid.org/0000-0003-4001-3212>

Элиава Ш.Ш. — <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>

Артемьев А.А. — <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>

Иванов В.М. — <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>

Смирнов А.Ю. — <https://orcid.org/0009-0001-2440-2499>

Стрелков С.В. — <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>

Автор, ответственный за переписку: Коновалов А.Н. — e-mail: ANKonovalov@nsi.ru

Как цитировать:

Коновалов А.Н., Окишев Д.Н., Пилипенко Ю.В., Элиава Ш.Ш., Артемьев А.А., Иванов В.М., Смирнов А.Ю., Стрелков С.В. Дополненная реальность как метод нейронавигации при микрохирургическом лечении цереброваскулярной патологии: описание метода и опыта применения. *Вопросы нейрохирургии имени Н.Н. Бурденко*. 2025; 89(1):37–45. <https://doi.org/10.17116/neiro20258901137>

Augmented reality as a method of neuronavigation in microsurgical treatment of cerebrovascular diseases: description of the method and clinical experience

© A.N. KONOVALOV^{1,2}, D.N. OKISHEV¹, YU.V. PILIPENKO¹, SH.SH. ELIAVA¹, A.A. ARTEMIEV², V.M. IVANOV³, A.YU. SMIRNOV³, S.V. STRELKOV⁴

¹Burdenko Neurosurgical Center, Moscow, Russia;

²Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia;

³Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia;

⁴Medgital LLC, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Augmented reality (AR) is a promising area in microsurgical treatment of cerebrovascular pathologies that can significantly facilitate preoperative planning and intraoperative understanding of anatomy.

Objective. To describe AR-assisted neuronavigation in microsurgical treatment of intracranial aneurysms, arteriovenous malformations and cavernomas; to evaluate accuracy and applicability of AR-assisted neuronavigation.

Material and methods. The study involved 22 patients with cerebral aneurysms, arteriovenous and cavernous malformations. Microsoft HoloLens 2 HMD glasses and «Medgital» software for AR navigation were used. Accuracy of registration (TRE and FRE) and time for preoperative preparation were evaluated.

Results. Mean TRE when using QR code was 0.6 ± 0.2 cm, when combining through craniometric points — 1.4 ± 0.6 cm. Time for preoperative image processing was 24.7 ± 5.1 minutes, application setup in the operating theatre — 1.6 ± 0.2 minutes. Combination using QR code provided higher accuracy of registration compared to craniometric points. AR-assisted navigation improved visualization and planning of surgeries for aneurysms, arteriovenous malformations, microvascular anastomoses and cavernous angiomas.

Conclusion. AR-assisted navigation is an innovative method with specific advantages that can potentially improve microsurgical treatment of cerebrovascular diseases. Further research is needed to confirm these findings and develop AR technology in neurosurgery.

Keywords: augmented reality, neuronavigation, vascular neurosurgery.

Information about the authors:

Konovalov A.N. — <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

Okishev D.N. — <https://orcid.org/0000-0003-0815-5624>

Pilipenko Yu.V. — <https://orcid.org/0000-0003-4001-3212>

Eliava Sh.Sh. — <https://orcid.org/0000-0001-6103-9329>

Artemiev A.A. — <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>

Ivanov V.M. — <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>

Smirnov A.Yu. — <https://orcid.org/0009-0001-2440-2499>

Strelkov S.V. — <https://orcid.org/0000-0002-5901-0866>

Corresponding author: Konovalov A.N. — e-mail: ANKonovalov@nsi.ru

To cite this article:

Konovalov AN, Okishev DN, Pilipenko YuV, Eliava ShSh, Artemiev AA, Ivanov VM, Smirnov AYu, Strelkov SV. Augmented reality as a method of neuronavigation in microsurgical treatment of cerebrovascular diseases: description of the method and clinical experience. *Burdenko's Journal of Neurosurgery*. 2025;89(1):37–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.17116/neiro20258901137>

Введение

Клипирование интракраниальных аневризм, удаление артериовенозных мальформаций, операции реваскуляризации и другие вмешательства сосудистой нейрохирургии — это технически сложные хирургические вмешательства, требующие тщательного предоперационного планирования, высокой интраоперационной точности и минимального риска для пациента [1]. Традиционные методы нейронавигации, основанные на предоперационном планировании и двумерном отображении, имеют определенные ограничения [2]. В последнее время все большее внимание привлекает метод дополненной реальности (от англ. augmented reality, AR) как перспективная альтернатива [3, 4].

AR — это технология, которая накладывает виртуальные изображения на реальный мир, создавая расширенный пользовательский интерфейс. В сосудистой нейрохирургии AR используется как метод навигации, помогая хирургам лучше визуализировать анатомические структуры и планировать операцию [5]. Трехмерные модели анатомических структур пациента дают дополнительную информацию хирургу о месте расположения нормальных сосудов и патологических образований в режиме реального времени [6].

Данное исследование направлено на оценку опыта применения нейронавигации методом AR в сосудистой нейрохирургии у 22 пациентов на базе ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России.

Таблица 1. Характеристика исследуемой группы

Патология	Пациенты, <i>n</i>	Цель применения AR-навигации
Аневризмы	11	Предоперационная разметка для выполнения доступа к аневризме. Предотвращение вскрытия лобной пазухи на этапе краниотомии
Артериовенозные мальформации	5	Навигация расположения АВМ, разметка краниотомии для обнажения всех поверхностных структурных элементов АВМ. Предотвращение повреждения крупных дренажных вен при трепанации
Наложение сосудистого анастомоза	3	Навигация донорских и реципиентных артерий при наложении ЭИКМА
Каверномы	3	Навигация расположения каверномы и прилежащих основных анатомических ориентиров. Разметка краниотомии

Примечание. АВМ — артериовенозная мальформация; ЭИКМА — экстра-интракраниальный микроанастомоз.

Цель исследования — описать метод AR, его преимущества и ограничения, а также потенциал технологии в сосудистой нейрохирургии.

Материал и методы

За период с февраля по апрель 2024 г. на базе нейрохирургического отделения №3 им. Ю.М. Филатова ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России апробирована методика AR-навигации методом НМД-очков Microsoft HoloLens 2 и программного обеспечения ООО «Меджитал». В рамках работы проведено 50 хирургических вмешательств, из которых в данное исследование включены 22 пациента с сосудистой патологией головного мозга. Эксперимент одобрен локальным этическим комитетом ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко» Минздрава России. Характеристика группы представлена в табл. 1.

Оборудование для AR-навигации

Система AR-навигации включает ноутбук с программным обеспечением ООО «Инобитек» (Воронеж), Blender (Blender.org), НМД-очки AR Microsoft HoloLens 2 с программным обеспечением ООО «Меджитал» (Санкт-Петербург).

Для создания индивидуальных 3D-голографических моделей для системы AR-навигации использовали разработанные совместно с ООО «Меджитал» протокол и программное обеспечение.

У всех пациентов получено согласие на участие в исследовании. Само по себе использование AR-навигации не влияло на выбор метода или изменение стандартного протокола хирургического лечения. AR-навигацию использовали как дополнительную информацию, которую мог применить оперирую-

щий хирург в ходе хирургического вмешательства. На микрохирургическом этапе с использованием нейрохирургического микроскопа AR-навигацию не задействовали. Сравнение с другими методами нейронавигации не производили ввиду принципиального отличия методов и их взаимодополняющего использования. Исследование носило пилотный характер, анализировали технические аспекты метода и его потенциальную применимость в клинической практике.

Для оценки эффективности методики AR-навигации выбраны несколько параметров. Анализировали затраты времени на этапах подготовки и проведения операции, включая предоперационную обработку изображений и моделирование проекта смешанной реальности. Время, затраченное на обработку данных компьютерной томографии и магнитно-резонансной томографии для создания 3D-моделей сосудистых патологий и анатомических объектов, было одним из ключевых показателей. Кроме того, учитывали время, необходимое для выгрузки моделей в очки AR Microsoft HoloLens 2 и настройку приложения перед операцией. Особое внимание уделяли времени, затраченному на совмещение виртуальной модели и краниометрических ориентиров пациента.

Точность навигации оценивали у всех пациентов. В случае краниотомии при аневризмах анализировали точность визуализации лобной пазухи и разметку краниотомии с целью сохранения целостности ее латеральной стенки. Также проводили разметку краниотомии при артериовенозных мальформациях (АВМ), каверномах и навигацию артерий при реваскуляризации (рис. 1). Точность устанавливали по смещению по осям *x* и *y*. Для этого сравнивали проецируемые изображения сосудистой патологии и реальные анатомические структуры. Путем измерения отклонений между ними в миллиметрах производили расчет Target Registration Error (TRE) and Fiducial Registration Error (FRE). Расчет этого показателя представлен на рис. 2 и выполнен по ранее предложенной методике [7].

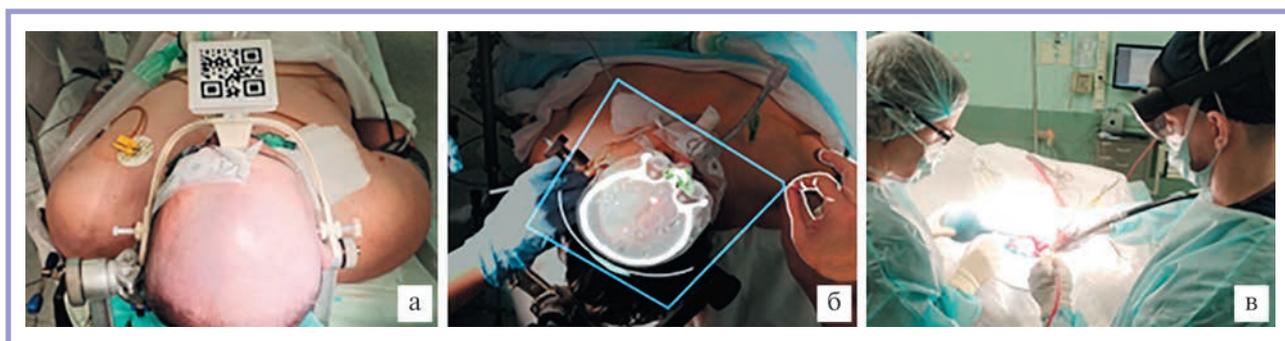


Рис. 1. Интраоперационная навигация методом дополненной реальности.

а — использование метода синхронизации модели посредством QR-кода с 3D-рамкой; б — синхронизация головы пациента с нейровизуализационными данными через AR-очки; в — вид выполняющего краниотомию хирурга в AR-очках.

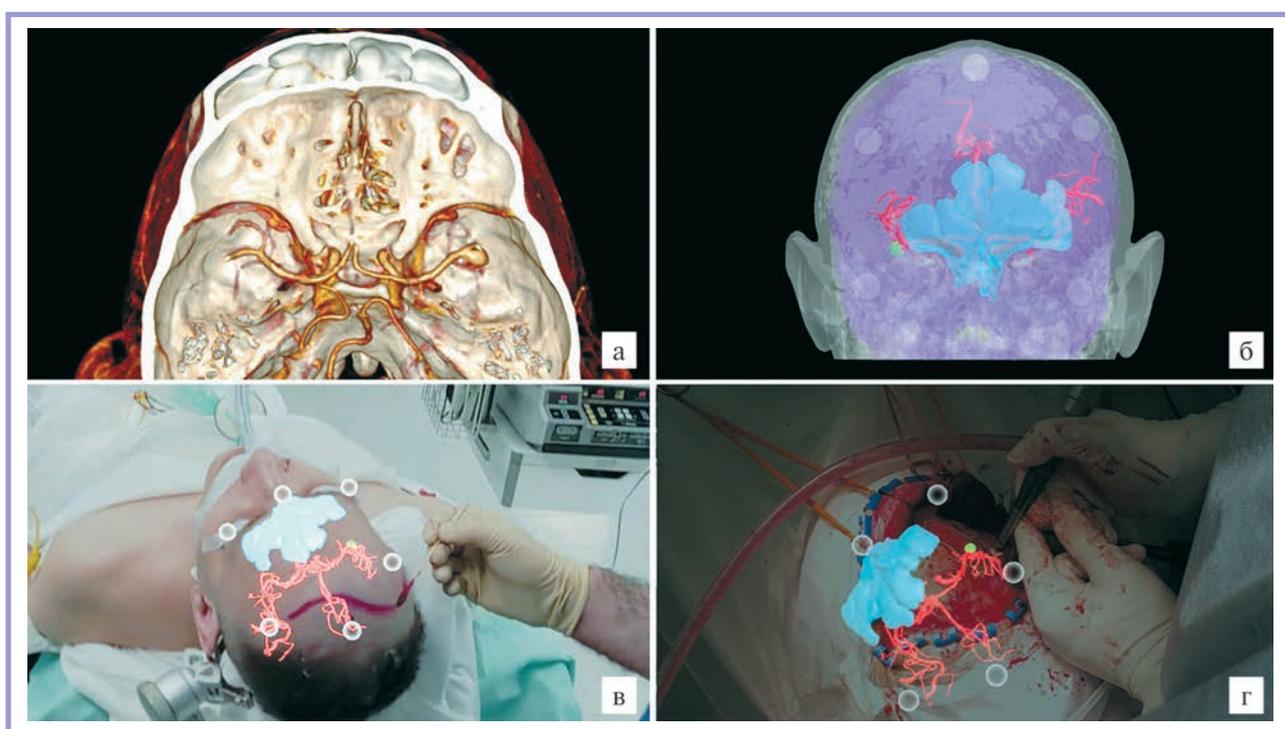


Рис. 2. Пример использования AR-навигации при аневризме правой средней мозговой артерии у пациента с большой лобной пазухой.

а — 3D-реконструкция компьютерно-томографической ангиографии, определяется аневризма правой средней мозговой артерии, отмечена белой стрелкой; б — 3D-модель сегментированных структур черепа, лобных пазух, сосудов передних отделов виллизиева круга и аневризмы правой средней мозговой артерии. Кроме того, расставлены маркеры на краниометрических точках для последующего совмещения: брегма, стеганион справа и слева, глабелла, латеральный угол глазницы справа и слева; в — модель совмещена по краниометрическим точкам с головой пациента в операционной. Производится предоперационная разметка разреза, проекции лобной пазухи и аневризмы; г — интраоперационное использование AR-навигации. Визуализированы 3D-проекции лобной пазухи, сосудов виллизиева круга и маркерные точки.

Результаты

Наиболее трудоемкой частью исследования было время, затраченное на предоперационную обработку изображений, моделирование и создание проекта смешанной реальности. Среднее время сегментации, моделирования и конвертации в формат .glb составило $24,7 \pm 5,1$ мин. В случае использования 3D-рамки

с QR-кодом требовалось дополнительное проведение КТ-исследования и совмещение серии КТ с .glb-проектом, что в среднем занимало до 30 мин. Время настройки приложения в операционной составило $1,6 \pm 0,2$ мин (табл. 2).

Время, необходимое для совмещения, зависело от его метода и занимало не более 1 минуты при использовании QR-кода на 3D-рамке. При совмеще-

Таблица 2. Оценка AR-навигации

Параметр	Использование QR-кода на 3D-рамке	Совмещение по краниометрическим точкам	Описание
Предоперационная обработка и моделирование glb Время (среднее±SD)		24,7±5,1 мин	Сегментация, моделирование и конвертация в формат glb
Настройка приложения в операционной Время (среднее±SD)		1,6±0,2 мин	Настройка перед операцией
Совмещение модели с головой пациента. Время (среднее±SD)	<1 мин	3,5±0,9 мин	Время, затраченное на подготовку к навигации
Ошибка целевой регистрации (TRE), среднее±стандартное отклонение	0,6±0,2 см	1,4±0,6 см	Оценка точности навигации
Ошибка регистрации по меткам (FRE), среднее±стандартное отклонение	0,4±0,4 см	0,9±0,4 см	

нии по краниометрическим точкам время составило $3,5\pm 0,9$ мин. Ошибки совмещения проекта смешанной реальности glb возникли в 2 (9%) случаях на этапе предоперационной подготовки. Оба случая возникли при совмещении модели методом сопоставления краниометрических точек и устранены в ходе проверки погрешности. Ошибок при совмещении модели методом QR-кода не было.

В данном исследовании оценены ошибки целевой регистрации (Target Registration Error, TRE) и регистрации по меткам (Fiducial Registration Error, FRE) для двух методов совмещения моделей с реальными анатомическими структурами: с использованием QR-кода на 3D-рамке и с применением краниометрических точек. Эти метрики являются ключевыми для оценки точности и надежности системы AR-навигации при нейрохирургических вмешательствах.

TRE определяется как среднеквадратичное отклонение между истинными положениями целевых точек на анатомической модели пациента и их предсказанными положениями на основе AR-навигации. В данном исследовании среднее значение TRE при использовании QR-кода на 3D-рамке составило $0,6\pm 0,2$ см, тогда как при совмещении по краниометрическим точкам этот показатель увеличился до $1,4\pm 0,6$ см. Среднее значение TRE при использовании QR-кода на 3D-рамке составило $0,6\pm 0,2$ см, что указывает на высокую точность данного метода регистрации. В свою очередь, при совмещении по краниометрическим точкам этот показатель увеличился до $1,4\pm 0,6$ см. Такое увеличение ошибки может быть обусловлено сложностью точного определения и совмещения краниометрических точек на голове пациента и модели, что приводит к большому разбросу значений.

FRE определяется как среднеквадратичное отклонение между истинными положениями меток на анатомической модели пациента и их предсказанными положениями на основе AR-навигации. В данном исследовании среднее значение FRE при использова-

нии QR-кода на 3D-рамке составило $0,4\pm 0,4$ см, тогда как при совмещении по краниометрическим точкам этот показатель составил $0,9\pm 0,4$ см.

Более высокие значения FRE при совмещении по краниометрическим точкам могут быть связаны с вариативностью в их определении и сложностью их точного распознавания системой. Такие результаты подчеркивают важность выбора надежного метода регистрации для обеспечения точности AR-навигации в нейрохирургии.

Краниотомии, выполненные на основании изображений AR, были точными и находились непосредственно над реальным местоположением патологии. Проецируемые 3D-изображения можно было легко перемещать жестами рук, чтобы не заслонять обзор хирурга.

Аневризмы

С AR-навигацией провели 11 микрохирургических вмешательств у пациентов с церебральными аневризмами. Использование AR в процессе предоперационного планирования позволило значительно улучшить визуализацию, обеспечивая высокую точность предполагаемой патологической анатомии пациента и продумывание хода вмешательства оперирующим хирургом. AR-технология позволила визуализировать аневризмы по отношению к окружающим анатомическим структурам, таким как околоносовые пазухи и краниометрические ориентиры, проекцию дна аневризмы по отношению к хирургическому доступу, венам Сильвиевой щели и проходящим мимо или спаянным с аневризмой артериальным сосудам (см. рис. 2). Возможность визуализировать аневризмы и их взаимоотношение с этими структурами в режиме реального времени позволила ни в одном из случаев не вскрыть лобные пазухи, точно определить расположение и пространственные характеристики аневризмы.

Артериовенозные мальформации

У пациентов с АВМ выполнили пять микрохирургических вмешательств с AR-навигацией. Применение технологии AR в процессе лечения позволило уточнить проекцию АВМ на поверхность головы, черепа и коры головного мозга (рис. 3). Во всех случаях применения AR-навигации для планирования доступа краниотомии произвели в проекции АВМ, средняя ошибка целевой регистрации (TRE) для группы пациентов с АВМ составила $1,2 \pm 0,5$ см. AR-технология значительно облегчила выполнение краниотомии при АВМ, позволяя хирургу видеть проекции ключевых сосудов и структур в режиме реального времени.

Создание экстра-интракраниальных микроанастомозов

За исследуемый период провели 3 микрохирургических вмешательства с использованием технологии AR для ревазуляризации у пациентов с цереброваскулярной патологией. Двум пациентам выполнили экстра-интракраниальный микроанастомоз между поверхностной височной артерией и М4-ветвью средней мозговой артерии, одному пациенту — анастомоз

затылочной артерии с дистальным сегментом задней нижней мозжечковой артерии.

Во всех случаях донорская артерия визуализирована при помощи AR-навигации, что позволило точно определить ее проекцию на кожу головы. Это существенно облегчает и ускоряет этап предоперационной разметки по сравнению с методами ультразвуковой или оптической навигации. AR-навигацию также использовали для проекционной разметки локализации реципиентных артерий, что позволило хирургу пространственно оценить ход предстоящего вмешательства и точно спланировать краниотомию. В случае ревазуляризации дистальной ветви М4 краниотомия может достигать больших размеров, чтобы обеспечить достаточное пространство для манипуляций, учитывая необходимость клипирования аневризмы и ревазуляризации при смещении мозга после уменьшения объема ликвора в ходе операции.

Для оценки точности AR-навигации при выполнении анастомозов показатель ошибки целевой регистрации (TRE) составил $1,3 \pm 0,4$ см. Это значение свидетельствует о высокой точности использования AR для навигации и планирования хирургических вмешательств, что значительно улучшает исходы операций.

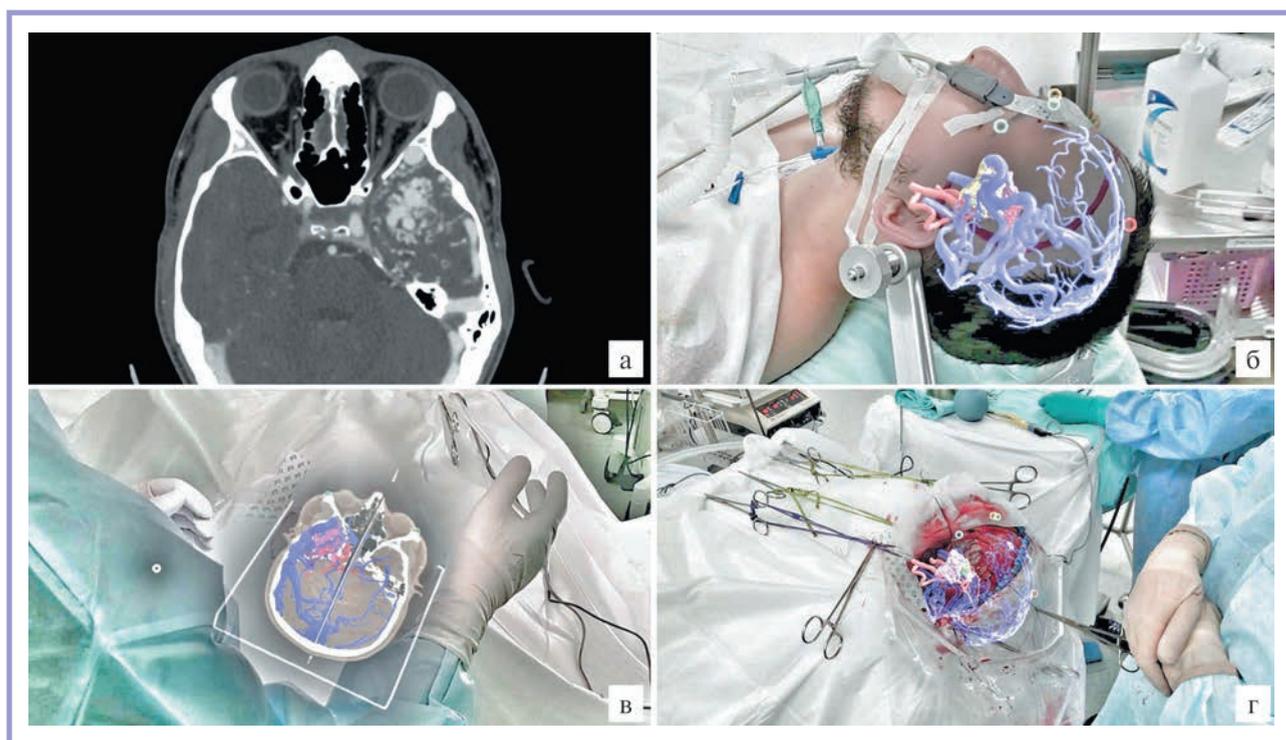


Рис. 3. Проекция компьютерно-томографической ангиографии пациента с артериовенозной мальформацией левой височной доли Spetzler-Martin III.

а — визуализация 3D-модели сосудистой системы головы пациента после наложения изображения в реальном времени с использованием AR-очков; б, в — использование AR-навигации для визуализации артериовенозной мальформации, ее структуры и проецирования компьютерно-томографической ангиографии в режиме интерактивной MPR в реальном времени; г — изображение выполненной краниотомии с наложенной AR-моделью. Разным цветом обозначены афферентные сосуды и дренажные вены.

Кавернозные ангиомы

За исследуемый период провели 3 микрохирургических вмешательства у пациентов с кавернозными ангиомами, где использовали технологию AR. Каждому пациенту выполняли разметку для проведения краниотомии с применением AR, что обеспечивало точное определение местоположения каверном и прилегающих анатомических ориентиров. Визуализация 3D-моделей позволила хирургу получить детальное представление о расположении кавернозных ангиом относительно краниометрических точек, индивидуальной анатомии борозд и извилин и нормальных сосудистых структур, таких как вены и проходящие рядом артерии. Это оптимизирует доступ к каверноме, выбор хирургического коридора и места энцефалотомии. Показатель ошибки целевой регистрации (TRE) у пациентов с каверномами составил $2,5 \pm 1,2$ см. Это объясняется малой группой пациентов и расположением каверном не на поверхности мозга, а в глубине полушария, что затрудняло расчет этого показателя.

Обсуждение

Применение AR в сосудистой нейрохирургии представляет собой многообещающую область исследования, которая может значительно улучшить точность и безопасность хирургических вмешательств. В этой статье мы рассмотрели потенциал AR в качестве инструмента навигации, подчеркнув как его преимущества, так и ограничения [8, 9].

Ключевым преимуществом AR является его способность проецировать цифровые изображения на реальные объекты, что позволяет хирургу перед операцией оценить взаимоотношение анатомических структур. Это может оказаться полезным в нейрохирургии, где необходимо оценить расположение как нормальных, так и патологических структур у конкретного пациента до операции, что ранее осуществлялось только на основе анализа 2D-изображений компьютерной и магнитно-резонансной томографии. AR может обеспечить визуальное руководство во время операции, помогая хирургам идентифицировать критически важные сосуды, избегать повреждения здоровых тканей и повышать точность манипуляций [8, 10].

Одно из главных преимуществ AR — возможность наложения 3D-моделей пациента, полученных с помощью сегментации компьютерно-томографических и магнитно-резонансно томографических изображений, на операционное поле. Это позволяет хирургу получить более полное представление о положении анатомических структур. Более того, AR может быть использована для визуализации траекторий инструментов, что дает возможность хирургу планировать движение до его фактического использования осу-

ществления [11, 12]. AR также может быть использована для интерактивного обучения и планирования операции. Например, хирурги могут использовать AR для моделирования операции на виртуальном пациенте, что позволяет им отработать технику перед реальным вмешательством [13, 14].

I. Cabriilo и соавт. проводили клипирование неразорвавшихся бессимптомных аневризм сосудов головного мозга различной локализации с использованием технологии AR [8]. Авторы работы отмечают пользу AR на этапе клипирования, что позволило снизить частоту репозиции клипс во время вмешательства. Однако использование AR не показало значимых различий в функциональных исходах хирургического лечения [14].

Работ, посвященных применению AR в микрохирургии артериовенозных мальформаций, значительно меньше. Технология AR не позволяет точно воспроизвести анатомию клубка АВМ, т. к. исследования, используемые в диагностике и сегментации АВМ, имеют ограничения в визуализации сосудов менее 1 мм в диаметре, однако этот метод навигации может быть полезен для более интуитивного понимания анатомии афферентных и эфферентных сосудов мальформации, ангиоархитектоники окружающих мальформацию сосудов, а выведение ее проекции на ткани головы и черепа может способствовать оптимизации краниотомии. При наличии острого кровоизлияния AR позволяет установить расположение внутримозговой гематомы, что может снизить риск нежелательного кровотечения и увеличить степень радикальности удаления АВМ. С. R. Li и соавт. описали клинический случай удаления разорвавшейся АВМ правой теменной доли. Авторы отмечают, что возможность проецирования функционально значимых зон в этой области головного мозга, питающих мальформацию артерий и дренирующих ее вен, способствовала безопасности вмешательства, а также позволила добиться радикального удаления АВМ. В качестве существенного преимущества данного метода авторы также отмечают отсутствие необходимости постоянного перевода взгляда с операционного поля на отдельный монитор (как в случае с нейронавигационными системами): проекция патологического очага всегда остается в поле зрения хирурга, что способствует субъективно более комфортному оперативному процессу [15].

В работе J. Ruchen и соавт. описано применение технологии AR при создании экстра-интракраниального анастомоза между поверхностной височной и средней мозговой артериями [16]. Наложение изображений сосудов, в которых были заинтересованы хирурги в целях дальнейшего анастомозирования, облегчило идентификацию сосуда-донора при диссекции мягкой тканью головы. Применение технологии AR также повлияло и на размер кожного разреза и краниотомии, способствуя уменьшению травматичности хирургического доступа.

Несмотря на значительные преимущества, AR в сосудистой нейрохирургии пока еще сталкивается с рядом ограничений. Одним из главных препятствий является необходимость высокой точности регистрации изображений. Для эффективного функционирования AR-системы требуется точное совмещение цифровых изображений пациента с реальным операционным полем. Любые ошибки в регистрации могут привести к неверным визуализированным данным и, следовательно, к неточному планированию и ошибкам во время операции. Пока что AR-навигация не является заменой оптическим системам и обладает меньшей точностью, однако достаточной для эффективной предоперационной разметки [9, 17].

Другой проблемой является доступность и стоимость AR-технологий. В настоящее время AR-системы для нейрохирургии дорогостоящи и требуют значительных инвестиций. Более того, не все больницы и нейрохирургические отделения имеют доступ к этим технологиям [13].

Технологии AR представляют перспективные возможности для улучшения планирования и навигации в сосудистой нейрохирургии. Однако необходимо продолжить исследования, чтобы преодолеть существующие ограничения и обеспечить безопасное и эффективное внедрение этой технологии в клиническую практику. По мере совершенствования технологии AR, она может стать неотъемлемой частью хирургического процесса, позволяя хирургам проводить более точные и безопасные операции [8, 9, 17].

Ограничения исследования

Одним из основных ограничений данного исследования является небольшой размер выборки пациентов. В исследовании приняли участие 22 пациента с различными видами цереброваскулярной патологии, что ограничивает возможность обобщения результатов и проведения детального сравнительного анализа. Необходимы дальнейшие исследования

с большим количеством участников для более точной оценки эффективности и надежности технологии AR-навигации. Кроме того, в данном исследовании не проведено сравнение с традиционными методами нейронавигации. В связи с принципиальными различиями в методологиях и их взаимодополняющим использованием, результаты настоящего исследования предоставляют лишь первичный опыт и предварительные данные, которые требуют дальнейшего изучения для более глубокой оценки преимуществ и ограничений каждого метода.

Заключение

Применение AR в микрохирургическом лечении цереброваскулярной патологии представляет собой перспективное направление, которое может существенно облегчить предоперационное планирование и интраоперационное понимание патологической анатомии. Этот подход способен улучшить результаты лечения и безопасность хирургических вмешательств. Будущее AR-технологий в нейрохирургии выглядит многообещающе, но требует дальнейшего изучения и оптимизации.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования — Коновалов А.Н., Окишев Д.Н., Элиава Ш.Ш.

Сбор и обработка материала — Артемьев А.А., Пилипенко Ю.В., Смирнов А.Ю., Стрелков С.В.

Написание текста — Коновалов А.Н., Окишев Д.Н.
Редактирование — Иванов В.М., Элиава Ш.Ш.

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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- Tabrizi LB, Mahvash M. Augmented reality-guided neurosurgery: Accuracy and intraoperative application of an image projection technique. *Journal of Neurosurgery*. 2015;123(1):206-211. <https://doi.org/10.3171/2014.9.JNS141001>
- Meola A, Cutolo F, Carbone M, Cagnazzo F, Ferrari M, Ferrari V. Augmented reality in neurosurgery: a systematic review. *Neurosurgical Review*. 2017;40(4):537-548. <https://doi.org/10.1007/s10143-016-0732-9>
- Guha D, Alotaibi NM, Nguyen N, Gupta S, McFaul C, Yang VX. Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications. *Canadian Journal of Neurological Sciences*. 2017;44(3):235-245. <https://doi.org/10.1017/cjn.2016.443>
- Коновалов А.Н., Габриелян Л.Р., Артемьев А.А., Тимофеева Е.Ю., Исагулян Э.Д., Фумин И.А., Окишев Д.Н., Пилипенко Ю.В., Элиава Ш.Ш., Иванов В.М., Смирнов А.Ю., Стрелков С.В. Технологии дополненной реальности в нейрохирургии: применение и ограничения. Обзор литературы. *Вестник неврологии*. 2024;(6) Konovalov AN, Gabrielyan LR, Artemyev AA, Timofeeva EYu, Isagulyan ED, Fumin IA, Okishev DN, Pilipenko YuV, Eliava ShSh, Ivanov VM, Smirnov AYU, Strelkov SV. Augmented reality technologies in neurosurgery: applications and limitations. Literature review. *Bulletin of Neurology*. 2024;(6). (In Russ.). <https://doi.org/10.33920/med-01-2406-11>

5. Inoue D, Cho B, Mori M, Kikkawa Y, Amano T, Nakamizo A, Yoshimoto K, Mizoguchi M, Tomikawa M, Hong J, Hashizume M, Sasaki T. Preliminary study on the clinical application of augmented reality neuronavigation. *Journal of Neurological Surgery Part A: Central European Neurosurgery*. 2013;74(2):71-76. <https://doi.org/10.1055/s-0032-1333415>
6. Kersten-Oertel M, Gerard I, Drouin S, Mok K, Sirhan D, Sinclair DS, Collins DL. Augmented reality in neurovascular surgery: feasibility and first uses in the operating room. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2015;10(11):1823-1836. <https://doi.org/10.1007/s11548-015-1163-8>
7. Haidegger T. Probabilistic Method to Improve the Accuracy of Computer-Integrated Surgical Systems. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2019;16(8):119-140. <https://doi.org/10.12700/APH.16.8.2019.8.8>
8. Cabrilo I, Bijlenga P, Schaller K. Augmented reality in the surgery of cerebral aneurysms: A technical report. *Neurosurgery*. 1982;10:252-261. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000000328>
9. Eves J, Sudarsanam A, Shalhoub J, Amiras D. Augmented Reality in Vascular and Endovascular Surgery: Scoping Review. *JMIR Serious Games*. 2022;10(3). <https://doi.org/10.2196/34501>
10. Salehahmadi F, Hajialiasgari F. Grand Adventure of Augmented Reality in Landscape of Surgery. *World Journal of Plastic Surgery*. 2019;8(2):135-145. <https://doi.org/10.29252/wjps.8.2.135>
11. Hey G, Guyot M, Carter A, Lucke-Wold B. Augmented Reality in Neurosurgery: A New Paradigm for Training. *Medicina (Lithuania)*. 2023;59(10):1721. <https://doi.org/10.3390/medicina59101721>
12. Sprenger L, Zegarek G, Schaller K, Tizi K, Bijlenga P. *Augmented Reality in Vascular Neurosurgery*. 2018
13. Shuhaiber JH. Augmented Reality in Surgery. *Archive in Surgery*. 2004;139(2):170-174. <https://doi.org/10.1001/archsurg.139.2.170>
14. Cannizzaro D, Zaed I, Safa A, Jelmoni AJM, Composto A, Bisoglio A, Schmeizer K, Becker AC, Pizzi A, Cardia A, Servadei F. Augmented Reality in Neurosurgery, State of Art and Future Projections. A Systematic Review. *Frontiers in Surgery*. 2022;9:864792. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2022.864792>
15. Li CR, Shen CC, Yang MY, Tsuei YS, Lee CH. Intraoperative Augmented Reality in Microsurgery for Intracranial Arteriovenous Malformation: A Case Report and Literature Review. *Brain Sciences*. 2023;13(4):653. <https://doi.org/10.3390/brainsci13040653>
16. Rychen J, Goldberg J, Raabe A, Bervini D. Augmented Reality in Superficial Temporal Artery to Middle Cerebral Artery Bypass Surgery: Technical Note. *Operative Neurosurgery*. 2020;18(4):444-50. <https://doi.org/10.1093/ons/opz176>
17. Aguilar-Salinas P, Gutiérrez Aguirre S Avila M, Nakaji P. Current status of augmented reality in cerebrovascular surgery: a systematic review. *Neurosurgical Review*. 2022;45(3):1951-1964. <https://doi.org/10.1007/s10143-022-01733-3>

Поступила/Received 14.08.2024
Принята к печати/Accepted 21.11.2024