

Применение AR-технологии как метода прокторинга и навигации при выполнении оперативных вмешательств: экспериментальное исследование

© Коновалов А.Н.^{1, 2*}, Окишев Д.Н.¹, Гребенев Ф.В.¹, Артемьев А.А.¹, Абзалов Т.Ю.², Ерохин И.А.², Сергеева С.С.², Вилковийский Ю.Ф.², Тимофеева Е.Ю.³, Кормилицина А.А.², Иванов В.М.⁴

¹ ФГАУ "Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко" Минздрава России; 125047 Москва, 4-я Тверская-Ямская улица, дом 16, Российская Федерация

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

³ ФГБУ "Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина" Минздрава России; 115478 Москва, Каширское шоссе, д. 23, Российская Федерация

⁴ ФГАУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого"; 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29Б, Российская Федерация

Актуальность. Технологии дополненной реальности (AR) активно внедряются в медицину, в том числе в нейрохирургию, в которой их применение способно повысить точность и безопасность операций, эффективность обучения. AR-навигация и телепрокторинг способны минимизировать риски, сократить время вмешательств и улучшить доступность специализированной помощи в регионах.

Цель исследования: оценка эффективности AR-технологий для нейронавигации, телепрокторинга и обучения неопытных хирургов на животных моделях, а также имитации базовых нейрохирургических манипуляций (люмбальная пункция).

Материал и методы. Проведено проспективное исследование на лабораторных животных: 10 крысах и 1 баране. Использованы AR-очки Microsoft HoloLens 2 и приложение Medgital Vision. У 10 крыс был осуществлен доступ к аорте и сонным артериям (5 – с использованием AR-навигации, 5 – без нее). У барана было проведено наложение экстра-интракраниального анастомоза под руководством хирурга с помощью AR-прокторинга, для которого применялся Google Meet. Также проведена имитация люмбальной пункции с наложением КТ-данных пациента на тело участника.

Результаты. Применение AR позволило уменьшить время операции и размер доступа. Удаленный прокторинг показал себя как эффективный способ обучения и консультации во время операции. При имитации люмбальной пункции проекция анатомических ориентиров была правильно спроецирована на тело пациента.

Заключение. AR-технологии продемонстрировали высокую эффективность для нейронавигации, телепрокторинга и обучения. Их внедрение в клиническую практику может повысить безопасность операций, сократить время вмешательств и расширить возможности дистанционного взаимодействия специалистов.

Ключевые слова: дополненная реальность (AR); нейрохирургия; нейроонкология; HoloLens 2; телепрокторинг; навигация

Авторы подтверждают отсутствие конфликтов интересов.

Для цитирования: Коновалов А.Н., Окишев Д.Н., Гребенев Ф.В., Артемьев А.А., Абзалов Т.Ю., Ерохин И.А., Сергеева С.С., Вилковийский Ю.Ф., Тимофеева Е.Ю., Кормилицина А.А., Иванов В.М. Применение AR-технологии как метода прокторинга и навигации при выполнении оперативных вмешательств: экспериментальное исследование. *Медицинская визуализация*. 2026; 30 (3): xxx-xxx. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1634>

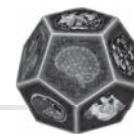
Поступила в редакцию: 02.02.2026.

Принята к печати: 03.06.2026.

Опубликована online: 1.10.2026.

Application of AR technology as a method of proctoring and navigation during surgical interventions: an experimental study

© Anton N. Konovalov^{1, 2*}, Dmitry N. Okishev¹, Fyodor V. Grebenev¹, Anton A. Artemyev¹, Timur Yu. Abzalov², Ivan A. Erokhin², Sofia S. Sergeeva², Iurii F. Vilkovyskii², Ekaterina Yu. Timofeeva³, Anastasia A. Kormilitsyna², Vladimir M. Ivanov⁴



¹ N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 16, 4rd Tverskaya-Yamskaya str., Moscow 125047, Russian Federation

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University); 8, bld. 2, Trubetskaya str., Moscow 119991, Russian Federation

³ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation; 23, Kashirskoe shosse, Moscow 115478, Russian Federation

⁴ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 29B, Politekhnicheskaya str., Saint Petersburg 195251, Russian Federation

Background. Augmented reality (AR) technologies are being actively integrated into medicine, including neurosurgery, where their application can enhance the accuracy and safety of operations and improve training effectiveness. AR navigation and teleproctoring have the potential to minimize risks, reduce intervention time, and improve access to specialized care in remote regions.

Objective. To evaluate the effectiveness of AR technologies for neuronavigation, teleproctoring, and training inexperienced surgeons using animal models, as well as simulating basic neurosurgical procedures (lumbar puncture).

Materials and methods. A prospective study was conducted on laboratory animals: 10 rats and 1 sheep. Microsoft HoloLens 2 AR glasses and the Medgital Vision application were used. Access to the aorta and carotid arteries was performed on 10 rats (5 with AR navigation, 5 without). An extracranial-intracranial anastomosis was performed on the sheep under AR-guided teleproctoring via Google Meet. Additionally, a lumbar puncture simulation was conducted by projecting patient CT data onto a participant's body.

Results. The use of AR reduced operation time and incision size. Remote teleproctoring proved effective for intraoperative training and consultation. In the lumbar puncture simulation, anatomical landmarks were accurately projected onto the participant's body.

Conclusion. AR technologies demonstrated high efficacy for neuronavigation, teleproctoring, and training. Their implementation in clinical practice could enhance surgical safety, reduce intervention time, and expand opportunities for remote collaboration among specialists.

Keywords: augmented reality (AR); neurosurgery; neurooncology; HoloLens 2; teleproctoring; navigation

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. The study had no sponsorship.

For citation: Konovalov A.N., Okishev D.N., Grebenev F.V., Artemyev A.A., Abzalov T.Y., Erokhin I.A., Sergeeva S.D., Vilkovskii I.F., Timofeeva E.Y., Kormilitsyna A.A., Ivanov V.M. Application of AR technology as a method of proctoring and navigation during surgical interventions: an experimental study. *Medical Visualization*. 2026; 30 (3): xxx-xxx. <https://doi.org/10.24835/1607-0763-1634>

Received: 02.02.2026.

Accepted for publication: 03.06.2026.

Published online: 1.10.2026.

Введение

Дополненная реальность (Augmented Reality – AR) – технология, позволяющая накладывать виртуальную информацию и объекты на реальный мир в режиме реального времени. AR находит применение во многих сферах жизни, в том числе в медицине. В частности, в нейрохирургии технологии AR могут применяться для нейронавигации. В ряде случаев это ускоряет оперативное вмешательство, повышает эффективность и безопасность [1–3].

AR также можно использовать как метод прокторинга, что позволяет более опытному хирургу независимо от своего местоположения оказывать экспертную помощь менее опытным коллегам в ходе оперативного вмешательства [4]. Потенциально это может быть внедрено в телемедицинскую практику, что увеличит доступность хирургической помощи пациентам в регионах, имеющих низкий опыт выполнения сложных нейрохирургических вмешательств [5].

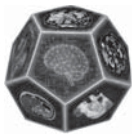
Также технология AR-прокторинга может стать эффективным инструментом в обучении молодых специалистов. Таким образом, применение AR-технологий в нейрохирургии имеет широкий потенциал.

В данном исследовании показано использование технологий AR как метода нейронавигации и прокторинга в условиях имитации нейрохирургических манипуляций на примере животных моделей. Также дополнительно оценено использование AR как метода прокторинга при симуляции люмбальной пункции, как одной из базовых манипуляций в нейрохирургии.

Материал и методы

Эксперименты с участием животных проводились в рамках апробации системы нейронавигации на основе дополненной реальности на базе кафедры топографической анатомии Первого МГМУ имени И.М. Сеченова, Москва, 2024 г. Экспериментальное исследование на лабораторных животных (*in vivo*) было проведено в соответствии с Методическим руководством ARRIVE (PLoS Bio 8(6), e1000412, 2010) [6]. Протокол исследования был рассмотрен и одобрен Локальным этическим комитетом в соответствии с протоколом № 2024-03 от 28 июня 2024 г.

Всем животным, участвующим в исследовании, проведена компьютерная томография (КТ) с целью последующей сегментации 3D-моделей. С помощью



DICOM-просмотрщика компании ООО «ИНОБИТЕК» отсегментированы костные структуры крыс и головы барана. Отсегментированные снимки загружены в AR-очки Microsoft HoloLens 2. Голограммы выводились с использованием приложения Medgital Vision компании ООО «Меджитал». Наложение виртуального полупрозрачного изображения сегментированных моделей на животных осуществлялось посредством сопоставления анатомических костных ориентиров.

Также в каждом эксперименте использовался AR-прокторинг. Онлайн-звонок осуществлялся через Google Meet. Хирург-ментор имел возможность видеть операционное поле от первого лица, осуществлять поддержку молодого хирурга посредством указаний и отправки анатомических схем в чат (рис. 2г).

Для первого эксперимента было использовано 10 крыс. Всех крыс наркотизировали, фиксировали. Осуществлялся доступ к аорте и сонным артериям. В основную группу вошло 5 животных, 5 студентов произвели оперативные вмешательства с применением AR-прокторинга (рис. 1а, г) и AR-навигации (рис. 1б-г). В контрольную группу вошло также 5 крыс, 5 студентов произвели вмешательства без использования AR-технологий. Оценивались продолжительность операции, величина разреза, травматичность операции (субъективно по объему кровопотери).

Для демонстрации возможности применения методов телепрокторинга и навигации с использованием технологий AR в качестве proof of concept использована модель крупного животного – барана. Все процедуры проводились в соответствии с международными стандартами гуманного обращения с лабораторными животными и одобрены этическим комитетом учреждения. Перед началом хирургического вмешательства баран был введен в состояние общего наркоза. После индукции наркоза осуществлялся постоянный мониторинг жизненно важных показателей, включая частоту сердечных сокращений, артериальное давление и насыщение крови кислородом.

Основной целью эксперимента была оценка возможностей применения технологий телепрокторинга и AR-навигации для выполнения сложных хирургических манипуляций. В рамках эксперимента выполнялись следующие этапы.

На первом этапе проводилось выделение сосудистого графта на нижней конечности животного. Оно включало разрез кожи, выделение поверхностной вены и ее подготовку для последующего использования в качестве трансплантата (рис. 2а).

На втором этапе осуществлялось выделение сосудисто-нервного пучка на шее животного, включая

доступ к внутренней сонной артерии и ее прилегающим структурам. Процедура проводилась с использованием микроскопической техники для минимизации травматизации тканей (рис. 2б).

Трепанация черепа выполнялась с использованием технологий AR. С помощью специализированного программного обеспечения трехмерная модель черепа животного проецировалась непосредственно на его голову, что позволяло точно определить место трепанации. При помощи виртуальной линейки измерялся размер краниотомии (рис. 2г).

После завершения трепанации выполнялось наложение экстра-интракраниального анастомоза между внутренней сонной артерией и корковой ветвью средней мозговой артерии. Для этого использовался ранее выделенный сосудистый графт. Наложение анастомоза проводилось под микроскопическим контролем с применением микрохирургических инструментов.

На всех этапах операции активно применялись технологии телепрокторинга и дополненной реальности. Это позволило удаленным экспертам наблюдать за процессом в режиме реального времени, давать рекомендации и контролировать выполнение ключевых этапов операции. Визуализация данных через AR-системы обеспечивала высокую точность и безопасность манипуляций, демонстрируя потенциал этих технологий для использования в клинической практике.

В третьем эксперименте была произведена имитация выполнения люмбальной пункции с применением технологий AR. Целью эксперимента являлась оценка возможностей AR-технологий для трансляции трехмерных объектов, проведения удаленного прокторинга и отработки алгоритма выполнения люмбальной пункции.

Для эксперимента использовались данные КТ позвоночника анонимизированного пациента. Эти данные были примерно наложены на тело реального участника эксперимента, что позволило создать виртуальную модель позвоночника, совмещенную с физическим положением участника. Сама пункция не выполнялась физически; вместо этого производилась имитация процедуры с использованием виртуальной указки в приложении Medgital Vision.

Проверялось, насколько точно данные КТ пациента могут быть спроецированы на тело реального участника эксперимента. Это позволяло определить правильность расположения анатомических ориентиров, необходимых для выполнения люмбальной пункции.

Удаленные эксперты наблюдали за процессом через систему телепрокторинга, давали рекомендации по выполнению манипуляций. Это позволило

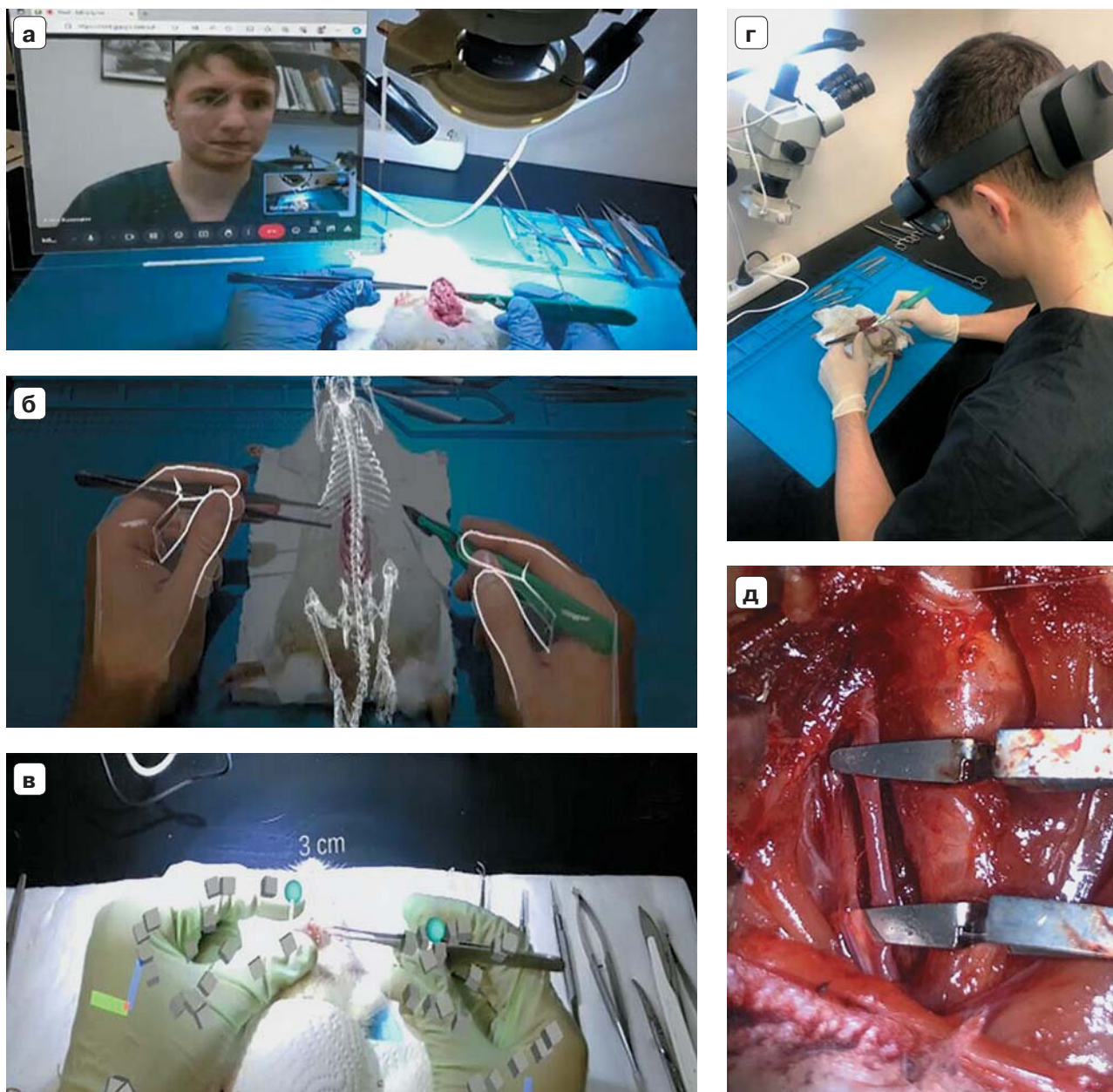
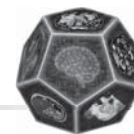


Рис. 1. Доступ к аорте и сонным артериям с применением AR-навигации и AR-прокторинга. **а** – этап разреза при доступе к аорте под контролем хирурга-ментора; **б** – этап разреза с применением AR-навигации. Полупрозрачная голограмма скелета крысы наложена на животное; **в** – доступ к сонным артериям с применением AR-навигации в виде динамической голограммы рулетки; **г** – вид оператора с AR-очками; **д** – вид выделенной сонной артерии.

Fig. 1. Access to the aorta and carotid arteries using AR-navigation and AR-proctoring. **a** – the incision stage during access to the aorta under the control of a surgeon-mentor; **б** – the incision stage using AR-navigation. A semi-transparent hologram of a rat skeleton is superimposed on the animal; **в** – access to the carotid arteries using AR-navigation in the form of a dynamic hologram of a roulette wheel; **г** – view of the operator with AR-glasses; **д** – view of the isolated carotid artery.

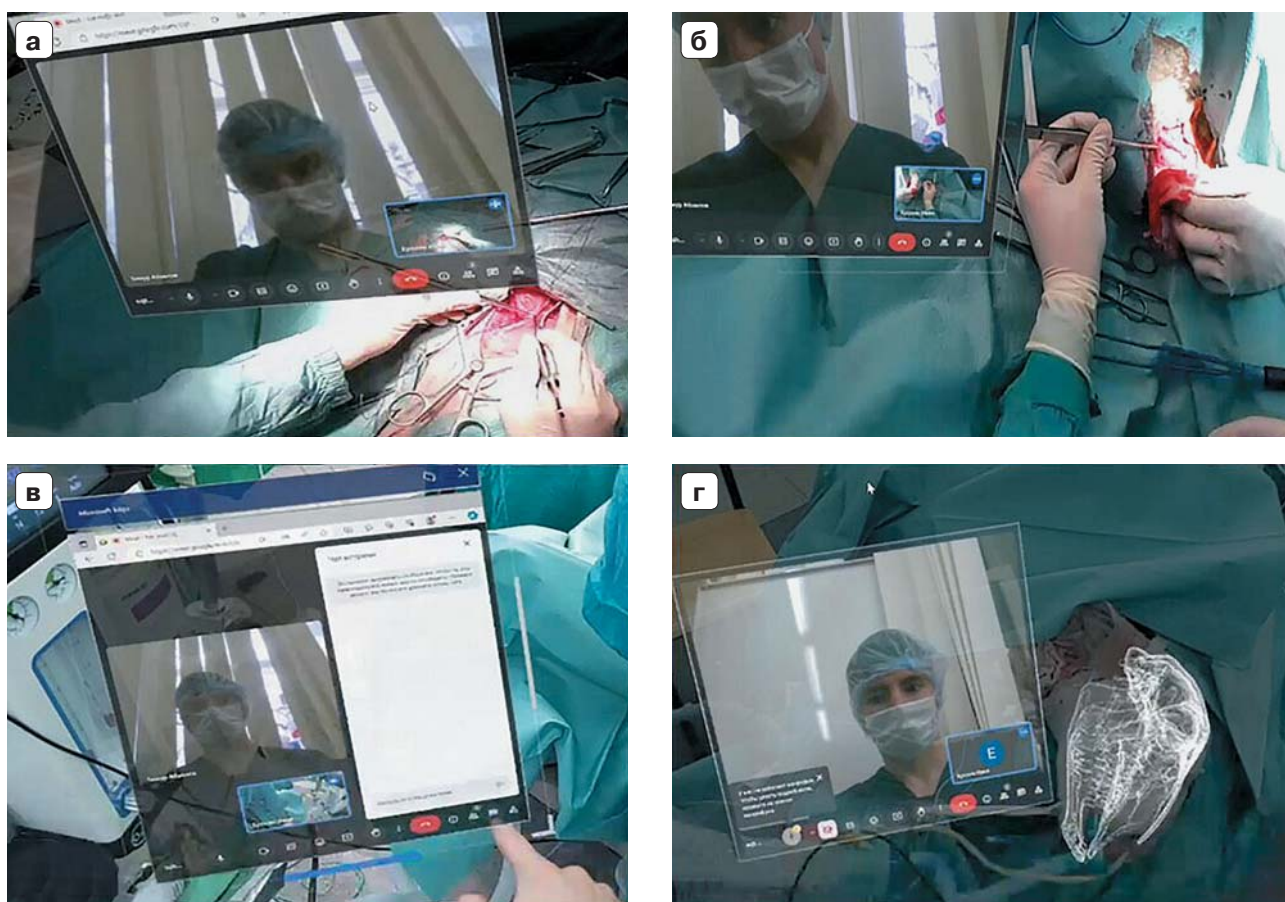
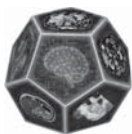


Рис. 2. Наложение ЭИКМА с применением AR-прокторинга и AR-навигации. **а** – этап выделения бедренного сосудисто-нервного пучка под контролем хирурга-ментора; **б** – этап выделения общей и внутренней сонных артерий на шее; **в** – чат, с помощью которого ментор может отправить оператору анатомические изображения; **г** – этап краниотомии. Наложена проекция черепа на голову животного с целью навигации.

Fig. 2. Superposition of EICMA using AR-proctoring and AR-navigation. **a** – the stage of isolating the femoral vascular-nerve bundle under the control of a surgeon-mentor; **б** – the stage of isolating the common and internal carotid arteries on the neck; **в** – the chat, with the help of which the mentor can send the operator anatomical images; **г** – the stage of craniotomy. The projection of the skull is super-imposed on the animal's head for navigation purposes.

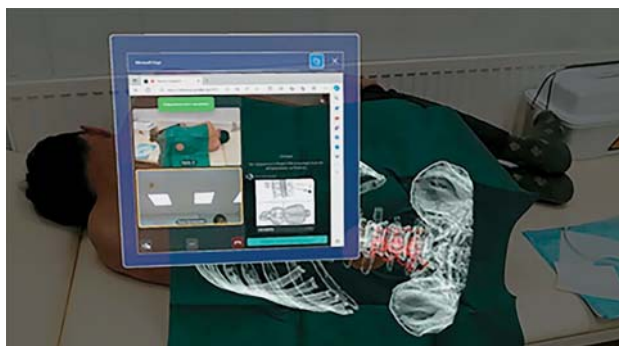
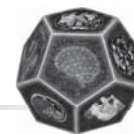


Рис. 3. Имитация процедуры люмбальной пункции с применением AR-прокторинга и AR-навигации. В чат оператору отправлено изображение с демонстрацией правильной техники выполнения манипуляции, проводится контроль алгоритма действий.

Fig. 3. Simulation of a lumbar puncture procedure using AR-proctoring and AR-navigation. An image demonstrating the correct technique for performing the manipulation is sent to the operator in the chat, and the algorithm of actions is monitored.



оценить эффективность удаленного взаимодействия между участниками эксперимента и экспертами.

С помощью виртуальной указки в приложении Medgital Vision участники эксперимента имитировали этапы выполнения люмбальной пункции, включая выбор точки вкола иглы и углов наклона инструментов.

Особое внимание уделялось проверке правильности положения участника эксперимента, которое должно соответствовать стандартным требованиям для выполнения люмбальной пункции. Это включало оценку положения тела, изгиба позвоночника и доступности области пункции (рис. 3).

Эксперимент был направлен на демонстрацию потенциала AR-технологий для обучения и совершенствования навыков выполнения люмбальной пункции, а также для использования этих технологий в качестве инструмента поддержки принятия решений в реальном времени (см. рис. 3).

Результаты исследования

Анализ данных выполнен с использованием SPSS v.23.0 (IBM Corp., Armonk, NY, США). Определение нормальности распределения выборки осуществлялось с помощью критерия Колмогорова-Смирнова, сравнение категориальных переменных осуществлено с помощью критерия χ^2 , а непрерывных переменных – с помощью дисперсионного анализа в случае, если исследуемый признак подвергался законам нормального распределения. В обратном случае использовался критерий U

Манна-Уитни для двух независимых выборок. Статистически значимая величина $p < 0,05$.

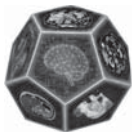
В первом эксперименте на крысах голограмма позвоночного столба позволяла сразу определить местонахождение аорты – сразу слева от позвонков. Это позволило статистически значимо сократить величину разреза в основной группе – начинать разрез чуть ниже реберной дуги и заканчивать чуть выше лобкового сочленения. В контрольной группе приходилось делать разрез от конца реберной дуги до лобкового сочленения с целью более широкого разведения краев раны, обнаружения позвоночного столба. AR-навигация также позволила сократить величину разреза и при доступе к сонным артериям, так как позволяла сразу видеть уровень шейных позвонков, а следовательно, и уровни щитовидного хряща, бифуркации общей сонной артерии.

Применение AR-прокторинга в эксперименте на крысах позволило статистически значимо сократить время, необходимое для доступа к сосудам. Указания хирурга-ментора позволяли более точно и быстро работать оператору. Однако необходимо отметить, что запуск очков и сопоставление голограммы или подключение к онлайн звонку требовали в среднем 1,5–2 мин, что нивелирует разницу во времени между основной и контрольной группами. Разницы в травматичности между двумя группами не было. Лишь 1 раз в контрольной группе возникло кровотечение из нижней поллой вены при ее отделении от аорты, что потребовало применения гемостатических материалов (см. таблицу).

Таблица. Результаты первого эксперимента

Table. Results of the first experiment

	Основная группа (AR) Experimental group (AR)	Контрольная группа Control group	p-value
Разрез при доступе к аорте, мм Incision length for aortic access, mm	34.1 ± 3.1	40.2 ± 3.3	<0.05
Разрез при доступе к сонным артериям, мм Incision length for carotid artery access, mm	28.2 ± 2.6	34.4 ± 2.7	<0.05
Продолжительность вмешательства при доступе к аорте, мин Procedure duration for aortic access, min	2.7 ± 2.0	4.0 ± 1.9	<0.05
Продолжительность вмешательства при доступе к сонным артериям, мин Procedure duration for carotid artery access, min	3.5 ± 2.8	4.9 ± 2.7	<0.05
Травматичность при доступе к аорте, n Trauma during aortic access, n (where 'n' is the number of cases or events)	0	1	
Травматичность при доступе к сонным артериям, n Trauma during carotid artery access, n	0	0	



Во втором эксперименте по наложению ЭИКМА под контролем хирурга-ментора оператор выделил графт на ноге в виде большой подкожной вены, сосудисто-нервный пучок на шее – общую сонную, внутреннюю и наружную сонные артерии, а также произвел птериональную трепанацию черепа. Применение AR-прокторинга позволило быстро и атравматично выделить бедренный и каротидный сосудисто-нервные пучки. Благодаря указаниям хирурга-ментора оператору легче было найти необходимый слой диссекции на ноге и шее. Наложение анастомоза происходило без AR-прокторинга, так как использование микроскопа ограничивало применение дополнительной гарнитуры на голове. Обе операции завершились успешно, анастомоз функционировал, животное экстубировано. Наблюдение за животным в течение трех дней после операции не выявило нового неврологического дефицита. Оператор отметил, что AR-прокторинг позволил работать более уверенно и спокойно, указания ментора позволили ускорить этапы, выделить необходимые сосуды, а наличие функции чата в Google Meet позволило отправить анатомическую схему, наличие которой в поле зрения оператора позволило лучше понимать интраоперационную анатомию. Недостатком AR-прокторинга была выделена нестабильность интернет-соединения, что приводило к отставанию голограммы, помехам связи.

В третьем эксперименте оценка точности наложения 3D-модели показала, что анатомические ориентиры были правильно спроецированы на тело участника, что обеспечило корректное определение точки вкола иглы и углов наклона инструментов. Ментор через систему телепрокторинга наблюдал за процессом и давал ценные рекомендации, подтвердив возможность эффективного удаленного взаимодействия.

С помощью встроенного мессенджера были отправлены фотографии пациента в нужном положении и необходимый уровень пункции. Имитация пункции с использованием виртуальной указки в приложении Medgital Vision позволила отработать алгоритм выполнения процедуры. Оценка алгоритмов выполненной процедуры соответствовало стандартным требованиям для выполнения люмбальной пункции (см. рис. 3).

Эксперимент подтвердил потенциал AR-технологий для обучения и совершенствования навыков выполнения медицинских процедур, таких как люмбальная пункция. Также было продемонстрировано, что данные технологии могут быть использованы для удаленного прокторинга и поддержки принятия решений в реальном времени.

Обсуждение

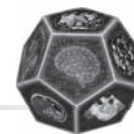
В данном исследовании были успешно продемонстрированы возможности применения технологий AR и телепрокторинга в трех различных сценариях: выполнении оперативных вмешательств на крысах, наложении экстра-интракраниального анастомоза у барана и имитации люмбальной пункции на человеке. Полученные результаты подтверждают перспективность этих технологий для повышения точности, безопасности и эффективности медицинских процедур, а также для использования в обучении и удаленной поддержке.

Во втором эксперименте AR-навигация на голове барана позволила точно определить необходимые границы разреза для трепанации и отметить границы самой трепанации на кости. Без ее использования в подобных операциях на животных приходилось размечать разрез и определять объем трепанации исключительно по костным ориентирам.

Результаты показали, что применение AR-навигации и прокторинга значительно сократило продолжительность операции и уменьшило травматичность вмешательств. Студенты, работавшие с AR-технологиями, выполнили операции быстрее и с меньшим объемом кровопотери по сравнению с контрольной группой. Это подтверждает, что AR-технологии могут быть полезны не только для опытных хирургов, но и для обучения студентов и молодых специалистов.

Наличие функции чата при AR-прокторинге позволяет ментору отправлять анатомические изображения оператору, что улучшает его ориентацию в ране. Возможность свободно манипулировать в сети Интернет, не нарушая при этом стерильность, является преимуществом использования технологий AR. Хирург может открывать перед собой анатомические атласы и другие пособия прямо в стерильных условиях, так как его манипуляции руками происходят в воздухе, не касаясь окружающих предметов.

В похожем исследовании Е.А. Felinska и соавт. [7] также апробировали AR-технологии с внедренной телемедициной. В их работе 40 студентов-медиков обучалось лапароскопическим операциям. Инструктор мог давать устные инструкции или проецировать жесты рук на изображение лапароскопа. Количество ошибок после инструктажа значительно снизилось ($0,18 \pm 0,56$ против $1,94 \pm 1,80$), а балльные оценки были значительно выше при использовании AR. В работе А. Cizmici и соавт. [8] результаты группы, обучавшейся с помощью телемедицины, были значительно лучше по сравнению с контрольной группой с традиционным методом обучения. Также в работе С. Wild и соавт. [9] телемедицина с AR при-



вела к значительному сокращению времени обучения лапароскопической холецистэктомии на печени свиньи у 60 неопытных студентов-медиков на 29,8% (1163 ± 275 против 1658 ± 375), удалось значительно снизить частоту ошибок.

Основным ограничением AR-навигации в наших экспериментах является частичное несоответствие голограммы реальной операционной картине. Особенно это демонстрируется в несоответствии голограммы костей лап крыс реальному положению их конечностей, так как КТ животным делали в положении, отличным от интраоперационного. Также это несоответствие было хорошо заметно при выполнении люмбальной пункции. КТ пациенту осуществляется в положении лежа на спине, соответственно, голограмма скелета представляет собой прямой позвоночник. Выполнение люмбальной пункции осуществляется в положении пациента лежа на боку с поджатыми к груди ногами, что приводит к изменению формы позвоночника, однако сама голограмма остается стабильной. Это является ограничением использования AR-навигации при выполнении манипуляций на подвижных частях тела человека, изменяющих свое положение относительно первоначальной КТ. Дополнительными ограничениями AR в данном эксперименте являются необходимость наличия КТ животных, пациента, что может быть затруднительно при осуществлении экстренной операции, а также временные затраты на сегментацию и загрузку снимков в очки, необходимость наличия навыка сегментации.

Стоит отметить, что уменьшить несоответствие голограммы реальной анатомии могут более точные методы совмещения AR-изображения и животного. Так, существуют методы совмещения по QR-коду, AR-указке, автоматическое по костным ориентирам и др. [10-15].

Ограничениями применения AR-прокторинга в наших экспериментах является необходимость наличия стабильного Интернет-соединения. При недостаточной мощности роутера видеоизображение ментора зависало.

Помимо применения AR как метода прокторинга и интраоперационной навигации, данные технологии можно использовать и в предоперационной подготовке пациентов. J. Olexa и соавт. [1] использовали AR для предоперационного планирования резекции вестибулярной шванномы у 47-летней пациентки, что позволило хирургу спланировать место трепанации черепа и оптимизировать правильное положение головы. M.E. Ivan и соавт. [16] также использовали AR в предоперационной подготовке 11 краниотомий по поводу удаления опухоли. Почти во всех случаях степень соответствия наложенной модели опухоли на череп была оценена как высокая.

Заключение

Проведенные эксперименты подтвердили перспективность применения AR-технологий и телепрокторинга при выполнении оперативных вмешательств. Эти технологии могут стать важным инструментом для повышения точности и безопасности медицинских процедур, а также для обучения и удаленной поддержки. Однако для их широкого внедрения в клиническую практику необходимы дальнейшие исследования и разработка соответствующих стандартов.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о финансировании. Статья подготовлена в рамках выполнения плана НИР по гранту РНФ "Внедрение технологий виртуальной и дополненной реальности в нейрохирургическую практику" (№ 23-75-01019).

Участие авторов

Коновалов А.Н. – концепция и дизайн исследования, статистическая обработка данных, статистическая обработка данных, утверждение окончательного варианта статьи.

Окишев Д.Н. – статистическая обработка данных, утверждение окончательного варианта статьи.

Гребенев Ф.В. – статистическая обработка данных, анализ и интерпретация полученных данных.

Артемьев А.А. – проведение исследования, сбор и обработка данных, написание текста, обзор публикаций по теме статьи.

Абзалов Т.Ю. – проведение исследования.

Ерохин И.А. – проведение исследования, сбор и обработка данных, подготовка и редактирование текста, ответственность за целостность всех частей статьи, подготовка, создание опубликованной работы.

Сергеева С.С. – проведение исследования.

Вилковский Ю.Ф. – проведение исследования.

Тимофеева Е.Ю. – участие в научном дизайне.

Кормилицына А.А. – участие в научном дизайне.

Иванов В.М. – участие в научном дизайне, утверждение окончательного варианта статьи.

Authors' participation

Kononov A.N. – concept and design of the study, statistical analysis, approval of the final version of the article.

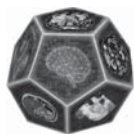
Okishev D.N. – statistical analysis, approval of the final version of the article.

Grebenev F.V. – statistical analysis, analysis and interpretation of the obtained data.

Artemyev A.A. – conducting research, collection and analysis of data, writing text.

Abzalov T.Y. – conducting research.

Erokhin I.A. – conducting research, collection and analysis of data, text preparation and editing, preparation and creation of the published work, responsibility for the integrity of all parts of the article.



Sergeeva S.D. – conducting research.

Vilkovyskii I.F. – conducting research.

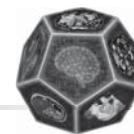
Timofeeva E.Y. – participation in scientific design.

Kormilitsyna A.A. – participation in scientific design.

Ivanov V.M. – participation in scientific design, approval of the final version of the article.

Список литературы [References]

1. Olexa J., Trang A., Flessner R., Labib M. Case Report: Use of novel AR registration system for presurgical planning during vestibular schwannoma resection surgery. *Front. Surg.* 2024; 11: 1304039. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2024.1304039>
2. Park B.J., Hunt S.J., Nadolski G.J., Gade T.P. Augmented reality improves procedural efficiency and reduces radiation dose for CT-guided lesion targeting: a phantom study using HoloLens 2. *Sci. Rep.* 2020; 10 (1): 18620. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75676-4>
3. 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>
Okishev D.N., Pilipenko Yu.V., Eliava Sh.Sh. et al. 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. <https://doi.org/10.17116/neiro20258901137> (In Russian, In English)
4. Hassan A.E., Desai S.K., Georgiadis A.L., Tekle W.G. Augmented reality enhanced tele-proctoring platform to intraoperatively support a neuro-endovascular surgery fellow. *Interv. Neuroradiol.* 2022; 28 (3): 277–282. <https://doi.org/10.1177/15910199211035304>
5. Tokunaga T., Yoshikawa M., Shimada M. The introduction of surgical telementoring systems in rural hospitals. *Wld J. Surg.* 2025; 49 (1): 84–88. <https://doi.org/10.1002/wjs.12418>
6. Percie du Sert N., Hurst V., Ahluwalia A. et al. The ARRIVE guidelines 2.0: Updated guidelines for reporting animal research. *PLoS Biol.* 2020; 18 (7): e3000410. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000410>
7. Felinska E.A., Fuchs T.E., Kogkas A. et al. Telestration with augmented reality improves surgical performance through gaze guidance. *Surg. Endosc.* 2023; 37 (5): 3557–3566. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09859-7>
8. Cizmic A., Müller F., Wise P.A. et al. Telestration with augmented reality improves the performance of the first ten ex vivo porcine laparoscopic cholecystectomies: a randomized controlled study. *Surg. Endosc.* 2023; 37 (10): 7839–7848. <https://doi.org/10.1007/s00464-023-10360-y>
9. Wild C., Lang F., Gerhäuser A.S. et al. Telestration with augmented reality for visual presentation of intraoperative target structures in minimally invasive surgery: a randomized controlled study. *Surg. Endosc.* 2022; 36 (10): 7453–7461. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09158-1>
10. Lysenko A., Razumova A., Yaremenko A. et al. The use of augmented reality navigation technology in combination with endoscopic surgery for the treatment of an odontogenic cyst of the upper jaw: A technical report. *Imaging Sci. Dent.* 2022; 52 (2): 225–230. <https://doi.org/10.5624/isd.20210256>
11. Ma L., Jiang W., Zhang B. et al. Augmented reality surgical navigation with accurate CBCT-patient registration for dental implant placement. *Med. Biol. Eng. Comput.* 2019; 57 (1): 47–57. <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1861-9>
12. Ivanov V.M., Krivtsov A.M., Strelkov S.V. et al. Practical Application of Augmented/Mixed Reality Technologies in Surgery of Abdominal Cancer Patients. *J. Imaging.* 2022; 8 (7): 183. <https://doi.org/10.3390/jimaging8070183>
13. Ochandiano S., García-Mato D., Gonzalez-Alvarez A. et al. Computer-Assisted Dental Implant Placement Following Free Flap Reconstruction: Virtual Planning, CAD/CAM Templates, Dynamic Navigation and Augmented Reality. *Front. Oncol.* 2022; 11: 754943. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.754943>
14. Гребеньков В.Г., Румянцев В.Н., Иванов В.М., Стрелков С.В., Балюра О.В., Дымников Д.А., Маркевич В.Ю., Кушнарев С.В., Железняк И.С., Пугачева В.С., Коржук М.С., Демко А.Е., Суrow Д.А. Периоперационное применение технологии дополненной реальности в хирургическом лечении больного местнораспространенным локорегионарным рецидивом рака прямой кишки. *Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова.* 2022; (12–2): 44–53. <https://doi.org/10.17116/hirurgia202212244>
Grebekov V.G., Rummyantsev V.N., Ivanov V.M. et al. Perioperative augmented reality technology in surgical treatment of locally advanced recurrent rectal cancer. *Pirogov Russian Journal of Surgery.* 2022; (12–2): 44–53. <https://doi.org/10.17116/hirurgia202212244> (In Russian)
15. Иванов В.М., Мамаев И.Р., Князев А.В., Стрелков С.В., Синегуб А.В., Смирнов А.Ю., Коновалов А.Н. Обзор методов наложения 3D-модели на пациента с использованием дополненной реальности в хирургии. *Вестник неврологии, психиатрии и нейрохирургии.* 2024. 12: 1534–1541. <https://doi.org/10.33920/med-01-2412-14>
Ivanov V.M., Mamaev I.R., Knyazev A.V. et al. Overview of methods for imposition of a 3D model on a patient using augmented reality in surgery. *Bulletin of Neurology, Psychiatry and Neurosurgery.* 2024; 12: 1534–1541. <https://doi.org/10.33920/med-01-2412-14> (In Russian)
16. Ivan M.E., Eichberg D.G., Di L., Shah A.H. Augmented reality head-mounted display-based incision planning in cranial neurosurgery: a prospective pilot study. *Neurosurg. Focus.* 2021; 51 (2): E3. <https://doi.org/10.3171/2021.5.FOCUS20735>



Для корреспонденции*: Коновалов Антон Николаевич – e-mail: ANKononov@nsi.ru

Коновалов Антон Николаевич – канд. мед. наук, врач-нейрохирург, научный сотрудник ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко” Минздрава России; старший научный сотрудник лаборатории носимых биосовместимых устройств и бионических протезов ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

Окишев Дмитрий Николаевич – канд. мед. наук, врач-нейрохирург, научный сотрудник ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-0815-5624>

Гребенев Фёдор Вячеславович – врач-нейрохирург ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0003-2622-7804>

Артемьев Антон Алексеевич – ординатор ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>

Абзалов Тимур Юрьевич – студент ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0009-0008-1321-563X>

Ерохин Иван Алексеевич – студент ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0009-0003-9584-5865>

Сергеева София Станиславовна – студентка ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0009-0007-4784-5640>

Вилковийский Юрий Федорович – студент ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0009-0009-2024-7936>

Тимофеева Екатерина Юрьевна – ординатор ФГБУ “НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина” Минздрава России, Москва. <https://orcid.org/0009-0002-0387-0768>

Кормилицына Анастасия Алексеевна – студентка ФГАУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), Москва. <https://orcid.org/0009-0006-5375-7404>

Иванов Владимир Михайлович – доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор Высшей школы теоретической механики и математической физики ФГАУ ВО “Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого”, Санкт-Петербург. <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>

Contact*: Anton N. Kononov – e-mail: ANKononov@nsi.ru

Anton N. Kononov – Cand. of Sci. (Med.), neurosurgeon, research fellow, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery; senior research fellow at the laboratory of wearable biocompatible devices and bionic Protheses, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-0932-4752>

Dmitry N. Okishev – Cand. of Sci. (Med.), neurosurgeon, research fellow, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow.

Fyodor V. Grebenov – neurosurgeon, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0003-2622-7804>

Anton A. Artemyev – resident, N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow. <https://orcid.org/0000-0002-3537-7997>

Timur Yu. Abzalov – student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0008-1321-563X>

Ivan A. Erokhin – student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0003-9584-5865>

Sofia S. Sergeeva – student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0007-4784-5640>

Iurii F. Vilkovyskii – student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0009-2024-7936>

Ekaterina Yu. Timofeeva – resident, N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow. <https://orcid.org/0009-0002-0387-0768>

Anastasia A. Kormilitsyna – student, I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow. <https://orcid.org/0009-0006-5375-7404>

Vladimir M. Ivanov – Dr. of Sci. (Phys.-Math.), Prof., Professor, Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg. <https://orcid.org/0000-0001-8194-2718>