

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

Применение навигационной системы на основе технологии дополненной реальности в челюстно-лицевой хирургии

А.В. Лысенко¹, А.И. Яременко², В.М. Иванов³, А.Ю. Смирнов³, А.И. Любимов⁴,
С. S. M. Izzard⁵, А.А. Прокофьева²

¹ Научно-исследовательский институт стоматологии и челюстно-лицевой хирургии, Санкт-Петербург, Россия;

² Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия;

⁴ Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия;

⁵ Эксетерский университет, Эксетер, Великобритания

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Навигационные системы с технологией дополненной реальности позволяют визуализировать различные анатомические структуры челюстно-лицевой области и являются возможной альтернативой стандартным системам хирургической навигации. Мы разработали специальную платформу для управления трёхмерными моделями и применения системы интраоперационной навигации с использованием технологии дополненной реальности при проведении хирургических процедур.

Цель. Оценка восприятия системы навигации с использованием технологии дополненной реальности хирургами и удобство её применения при выполнении наиболее распространённых вмешательств в челюстно-лицевой хирургии.

Материалы и методы. Мы провели фантомное исследование, чтобы определить точность работы системы навигации с использованием технологии дополненной реальности при проведении хирургических операций челюстно-лицевой области. Были определены погрешности регистрации, наблюдаемые в ходе хирургических операций под визуализационным контролем: погрешность регистрации опорных меток, погрешность регистрации мишеней и погрешность локализации опорных меток. После этого было проведено клиническое исследование при участии нескольких хирургов, выполнявших хирургические вмешательства на челюсти с использованием технологии дополненной реальности. По результатам работы с системой навигации с использованием технологии дополненной реальности хирурги заполняли специальный опросник.

Результаты. Среднее значение погрешности регистрации опорных меток составило 0,9 мм (стандартное отклонение 0,7 мм; 95% доверительный интервал 0,4–1,3 мм). Среднее значение погрешности регистрации мишеней составило 1,3 мм (стандартное отклонение 0,5 мм; 95% доверительный интервал 1,1–1,5 мм). Величина погрешности локализации опорных меток была наиболее значительной и составила 2,2 мм (стандартное отклонение 0,9; 95% доверительный интервал 1,9–2,5 мм). Высокие показатели по результатам заполнения опросника для оценки впечатления от использования объяснялись новизной системы навигации с использованием технологии дополненной реальности в челюстно-лицевой хирургии и энтузиазмом от её использования. Прагматический аспект качества касается технической направленности восприятия, то есть насколько продукт, система или услуга помогают достичь целей, поставленных на этапе их разработки. Ожидалось, что эффективность системы будет несколько выше, однако, по нашему мнению, полученные показатели связаны с техническими трудностями, возникшими при реализации новой технологии дополненной реальности в системе.

Заключение. Результаты показали удовлетворительную точность работы системы навигации с использованием технологии дополненной реальности при выполнении операций в челюстно-лицевой хирургии, и опыт её использования у хирургов был положительным.

Ключевые слова: дополненная реальность; интраоперационная навигация; челюстно-лицевая хирургия.

Как цитировать:

Лысенко А.В., Яременко А.И., Иванов В.М., Смирнов А.Ю., Любимов А.И., Izzard Ch. S. M., Прокофьева А.А. Применение навигационной системы на основе технологии дополненной реальности в челюстно-лицевой хирургии // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 3. С. 450–466. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

Application of augmented reality navigation in oral surgery

Anna V. Lysenko¹, Andrey I. Yaremenko², Vladimir M. Ivanov³, Anton Yu. Smirnov³, Aleksandr I. Lyubimov⁴, Charles S.M. Izzard⁵, Alina A. Prokofeva²

¹ Research Institute of Dentistry and Maxillofacial Surgery, Saint Petersburg, Russia;

² Academician I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

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

⁴ Kirov's Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia;

⁵ University of Exeter, Exeter, United Kingdom

ABSTRACT

BACKGROUND: Augmented reality is a potential alternative for surgical navigation, as it can provide visualization of various anatomical structures of the maxillofacial region. We have developed a specific platform for three-dimensional model management and intraoperative augmented reality navigation for surgical procedures.

AIM: To evaluate surgeons' perceptions and the usability of augmented reality navigation for the most common surgical procedures in oral surgery.

MATERIALS AND METHODS: We performed a phantom study to determine the accuracy of the augmented reality system in the maxillofacial region. Registration errors typical in image-guided surgery were measured: fiducial registration error, target registration error, and fiducial localization error. Thereafter, a clinical trial with several surgeons performing surgical procedures on jaws using augmented reality technology was conducted. Surgeons filled out a dedicated questionnaire after their experience with augmented reality navigation.

RESULTS: The mean fiducial registration error was 0.9 mm (standard deviation 0.7 mm; 95% confidence interval 0.4–1.3 mm). The mean target registration error was 1.3 mm (standard deviation 0.5 mm; 95% confidence interval 1.1–1.5 mm). The fiducial localization error was the most significant with 2.2 mm (standard deviation 0.9; 95% confidence interval 1.9–2.5 mm). The higher rankings in the user experience questionnaire were related to the novelty and excitement of using augmented reality navigation in maxillofacial surgery. The pragmatic quality aspect explains the technical focus of perception to achieve goals in a product, system, or service design. Efficiency was expected to be slightly higher; however, in our opinion, this is due to the technical difficulties of the system for novel augmented reality technology.

CONCLUSION: The results revealed the satisfactory accuracy of the augmented reality system in the maxillofacial region and the user experience of the augmented reality navigation system for oral surgery.

Keywords: augmented reality; intraoperative navigation; oral surgery.

To cite this article:

Lysenko AV, Yaremenko AI, Ivanov VM, Smirnov AY, Lyubimov AI, Izzard CSM, Prokofeva AA. Application of augmented reality navigation in oral surgery. *Digital Diagnostics*. 2024;5(3):450–466. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

Submitted: 05.12.2023

Accepted: 10.04.2024

Published online: 09.10.2024

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

基于增强现实技术的导航系统在颌面外科中的应用

Anna V. Lysenko¹, Andrey I. Yaremenko², Vladimir M. Ivanov³, Anton Yu. Smirnov³, Aleksandr I. Lyubimov⁴, Charles S.M. Izzard⁵, Alina A. Prokofeva²

¹ Research Institute of Dentistry and Maxillofacial Surgery, Saint Petersburg, Russia;

² Academician I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

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

⁴ Kirov's Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia;

⁵ University of Exeter, Exeter, United Kingdom

摘要

论证。采用增强现实技术的导航系统可实现颌面部各种解剖结构的可视化，是标准手术导航系统的可选方案。我们开发了一个管理三维模型特殊平台，并利用增强现实技术，将术中导航系统应用于外科手术。

目的。评估外科医生对使用增强现实技术的导航系统的看法，以及该系统在进行颌面手术中最常见的干预措施时的可用性。

材料和方法。为了确定在颌面外科手术中使用增强现实技术的导航系统的准确性，我们进行了一项仿真模型的研究。确定了在手术过程中成像控制下观察到的配准误差：标志点配准误差、目标配准误差和标志点定位误差。随后，几位外科医生利用增强现实技术进行了颌骨手术的临床研究。外科医生们根据他们使用增强现实导航系统的工作情况填写了一份专门的调查表。

结果。标志点配准误差的平均值为0.9mm（标准偏差为0.7mm；95%置信区间为0.4–1.3mm）。目标配准误差平均值为1.3mm（标准偏差为0.5mm；95%置信区间为1.1–1.5mm）。标记点定位误差值最大，且为2.2mm（标准偏差为0.9毫米；95%置信区间为1.9–2.5mm）。在口腔颌面外科中，使用增强现实技术的导航系统，因系统的新颖性和使用的积极性在用户体验问卷中获得高分。质量的实用性涉及感知的技术导向，即产品、系统或服务在多大程度上有助于实现其开发阶段设定的目标。本来期待系统的效率会稍高一些，但是，我们认为，所获得的指标与在系统中实施新的增强现实技术时遇到的技术困难有关。

结论。结果表明，在颌面外科手术中使用增强现实技术的导航系统的准确性令人满意，外科医生的使用体验良好。

关键词：增强现实；术中导航；颌面外科。

引用本文：

Lysenko AV, Yaremenko AI, Ivanov VM, Smirnov AY, Lyubimov AI, Izzard CSM, Prokofeva AA. 基于增强现实技术的导航系统在颌面外科中的应用. *Digital Diagnostics*. 2024;5(3):450–466. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD624183>

收到: 05.12.2023

接受: 10.04.2024

发布日期: 09.10.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Спектр вмешательств, выполняемых челюстно-лицевыми хирургами, крайне разнообразен. На костной ткани верхней и нижней челюстей проводится большинство операций, а именно: удаление ретенированных и сверхкомплектных зубов, кист, крупных новообразований и инородных тел [1, 2].

При выполнении подобных процедур могут возникать сложности, связанные с индивидуальным анатомическим строением нервов и корней зубов. Во избежание повреждения анатомических структур применяются методы медицинской визуализации. Кроме того, при проведении хирургических вмешательств в области головы используются различные навигационные системы [3].

Навигационные системы с технологией дополненной реальности (augmented reality, AR) позволяют обеспечить визуализацию одонтогенных кист, новообразований, инородных тел и анатомических структур и являются возможной альтернативой традиционным системам хирургической навигации [4, 5]. Используя сложный процесс регистрации для получения целостного изображения, AR-технология объединяет виртуальные объекты с трёхмерной индивидуальной для каждого пациента реальной средой. В устройствах дополненной реальности на реальное изображение с помощью полупрозрачного экрана накладывается виртуальная информация.

Трёхмерное рентгенографическое изображение черепно-лицевой области получают методом конусно-лучевой компьютерной томографии (КЛКТ). КЛКТ позволяет получить высокоточные изображения твёрдых тканей, которые можно использовать для анализа и формирования целостного изображения зоны вмешательства в челюстно-лицевой хирургии. Трёхмерные (3D) модели, создаваемые на основе КЛКТ-изображений, дают возможность визуализировать поражение и его расположение относительно анатомических структур. Внедрение 3D-изображений в систему AR-навигации облегчает обнаружение очага поражения, ретенированного зуба или инородного тела и тем самым обеспечивает точность выполнения вмешательств под контролем 3D-визуализации [6–8].

Мы разработали специальную платформу для управления 3D-моделями и навигации в челюстно-лицевой хирургии с применением 3D-технологий. Платформа позволяет реконструировать процесс выполнения вмешательства в виртуальной среде, начиная с этапа предоперационного планирования до интраоперационной AR-навигации [9, 10].

ЦЕЛЬ

Оценка восприятия системы AR-навигации хирургами и удобство её использования при выполнении наиболее распространённых вмешательств в челюстно-лицевой хирургии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первоначально было произведено фантомное исследование, направленное на определение точности работы AR-системы при проведении вмешательств в челюстно-лицевой области. После этого было выполнено клиническое исследование при участии нескольких хирургов, выполнявших хирургические вмешательства на челюсти с использованием технологии AR. По результатам работы с системой AR-навигации хирурги заполняли специальный опросник.

Этическая экспертиза

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (№ 261 от 25.04.2022).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ AR-НАВИГАЦИИ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ХИРУРГИИ

На точность хирургической операции с применением компьютерных технологий оказывают влияние несколько погрешностей. Наиболее важное значение имеют погрешность регистрации опорных меток (fiducial registration error, FRE), погрешность регистрации мишеней (target registration error, TRE) и погрешность локализации опорных меток (fiducial localization error, FLE). Погрешности регистрации отражают точность навигационного оборудования. Они нередко возникают в ходе хирургических операций. В исследовании оценивалась точность работы системы AR-навигации при выполнении вмешательств в челюстно-лицевой хирургии.

Погрешность регистрации опорных меток

Если указатель модели привязан к измерённому указателю, наличие FLE приведёт к появлению погрешностей расчётного поворота и перемещения изображения. FRE — это остаточные погрешности при определении местоположения опорных меток после регистрации.

При проведении КЛКТ для калибровки положения AR-метки к голове пациента прикрепляли держатель со съёмным локализатором рентгеноконтрастных меток. На лице пациента были закреплены три металлических рентгеноконтрастных шарика: на правой и левой щеках и на спинке носа (рис. 1).

Непосредственно после КЛКТ металлические рентгеноконтрастные шарики сегментировали в программе Slicer3D, а изображение калибровали и загружали в очки

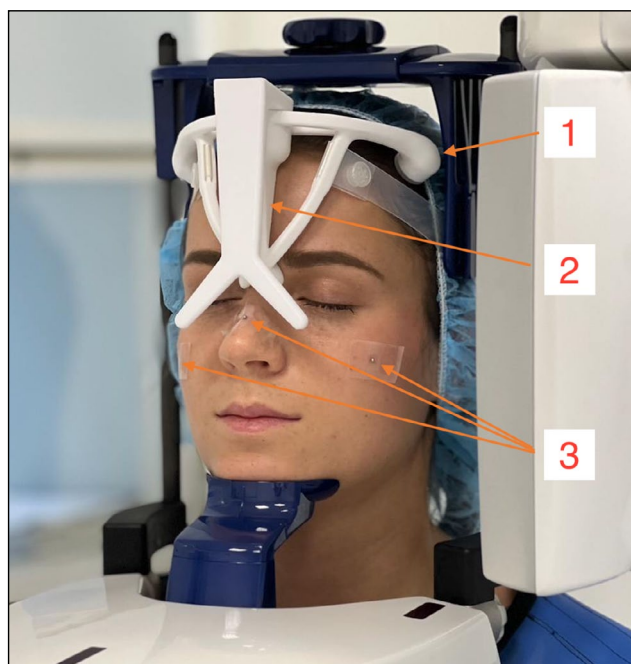


Рис. 1. Проведение конусно-лучевой компьютерной томографии. 1 — держатель; 2 — съёмный локализатор рентгеноконтрастных меток; 3 — три металлических рентгеноконтрастных шарика на лице пациента.

дополненной реальности с помощью программы Medgital Vision Editor (рис. 2).

Съёмный локализатор рентгеноконтрастных точек был заменён на лице пациента AR-меткой (рис. 3).

При этом с помощью AR-очков осуществлялся визуальный контроль положения металлических рентгеноконтрастных шариков (рис. 4).

С помощью метки трое исследователей поочередно отмечали местоположение металлических рентгеноконтрастных шариков на лице пациента, руководствуясь изображением, загруженным в AR-очки (рис. 5).

Было изменено расстояние между центром рентгеноконтрастной метки и точкой её расположения в соответствии с данными AR.

Погрешность регистрации мишеней

Исследователи, как правило, изучают точки, которые не имеют местоположения опорных меток. Любая подобная точка (не используемая для регистрации) называется мишенью. TRE — это погрешность, соответствующая расстоянию между истинным и зарегистрированным местоположением мишени.

Для определения данной погрешности было напечатано восемь специальных композитных 3D-моделей челюстей, на которые были нанесены по три рентгеноконтрастных метки, соответствующие центральному резцу, левому и правому премолярам (рис. 6).

Была выполнена КЛКТ моделей с последующей сегментацией рентгеноконтрастных меток и загрузкой сегментированных изображений в AR-очки в программе Medgital Vision Editor (рис. 7).

Затем исследователь в AR-очках визуально проверял местоположение рентгеноконтрастных меток (рис. 8).

С помощью отслеживаемого карандаша исследователь отмечал местоположение рентгеноконтрастных меток, видимое через AR-очки (рис. 9).

Было измерено расстояние между центрами рентгеноконтрастных меток и точками, нанесёнными отслеживаемым карандашом.

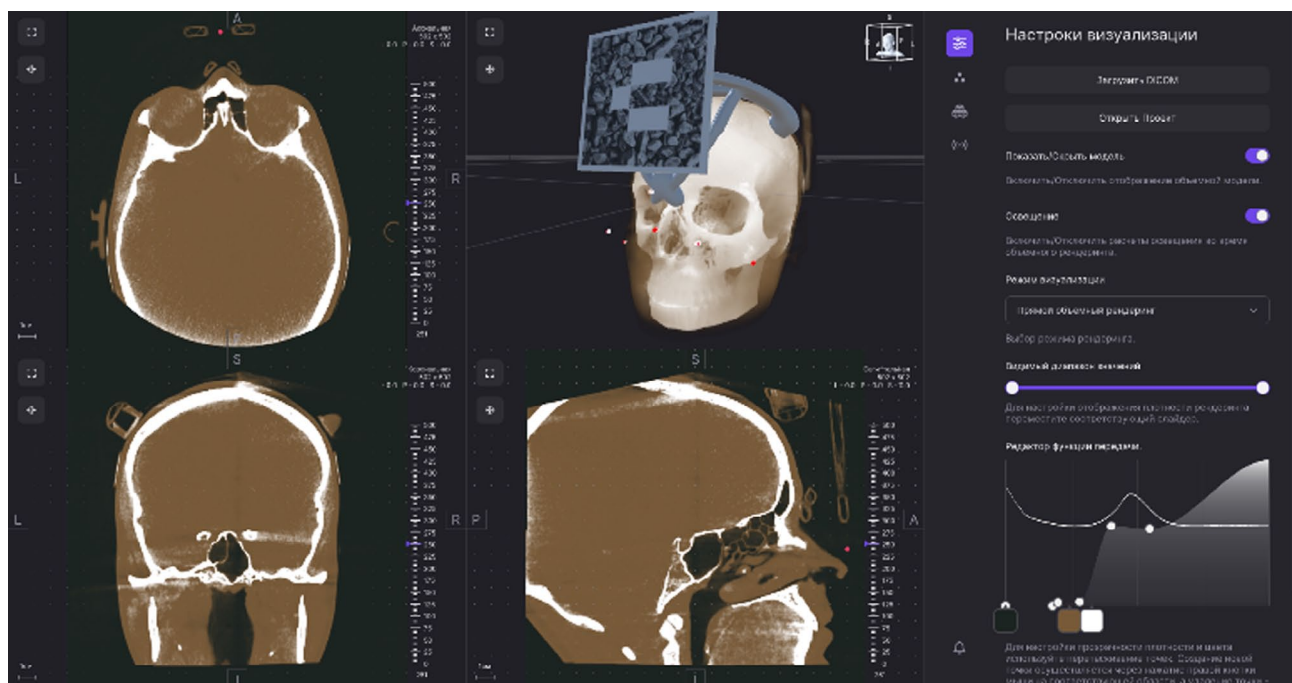


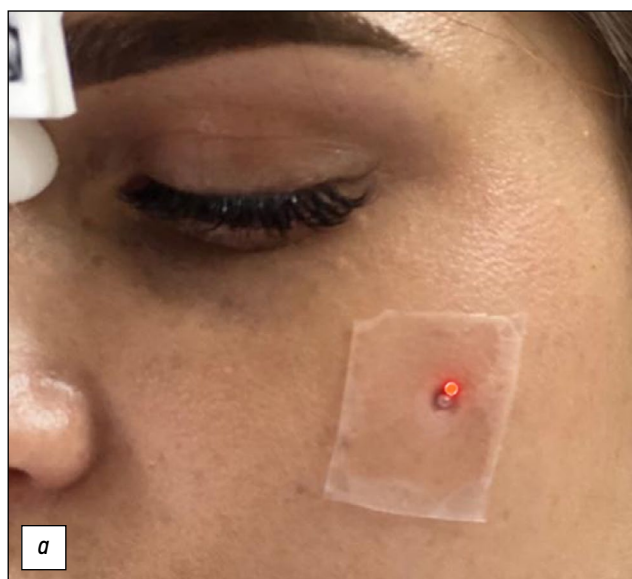
Рис. 2. Этап сегментации в программе Medgital Vision Editor.



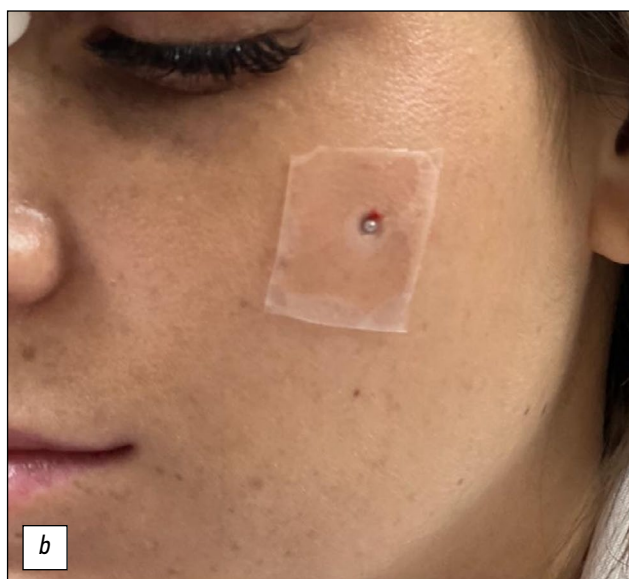
Рис. 3. Лицо пациента с AR-меткой.



Рис. 4. Изображение лица пациента через AR-очки: контроль местоположения металлических рентгеноконтрастных шариков.



a



b

Рис. 5. Местоположение металлических рентгеноконтрастных шариков на лице пациента: *a* — проекция шарика через AR-очки; *b* — местоположение шарика, отмеченное исследователем через AR-очки.



Рис. 6. 3D-модель челюсти с тремя рентгеноконтрастными метками 1, 2 и 3.

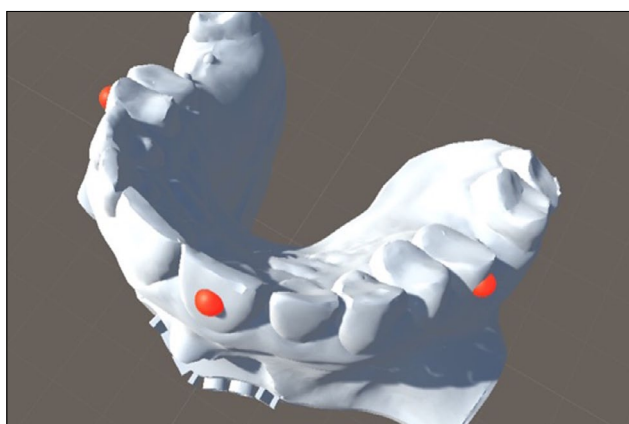


Рис. 7. Рентгеноконтрастные метки на этапе сегментации в программе Medgital Vision Editor.

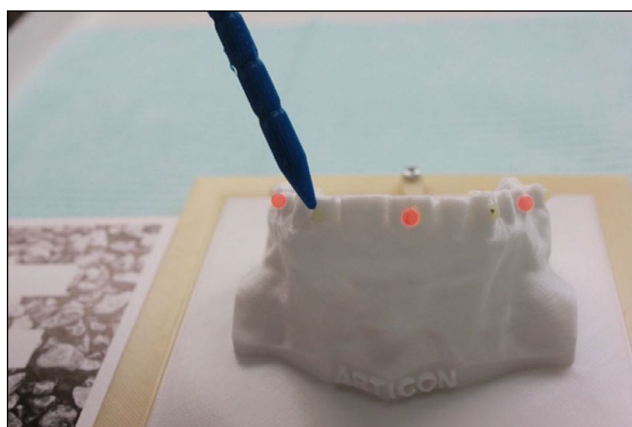


Рис. 8. Местоположение рентгеноконтрастной метки через AR-очки.



Рис. 9. Отмеченное исследователем местоположение рентгеноконтрастных меток через AR-очки.

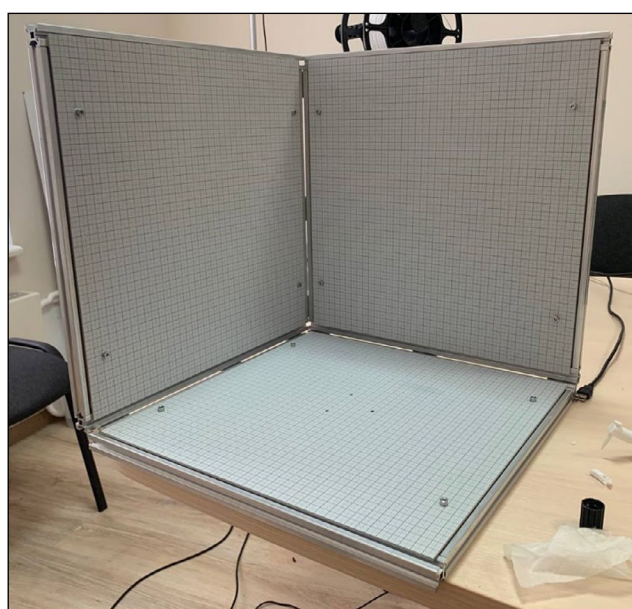


Рис. 10. Измерительный стенд.

Погрешность локализации опорных меток

Точное местоположение опорных меток невозможно определить из-за погрешностей измерения системы отслеживания. FLE — это погрешность между фактическим местоположением метки и её местоположением, определённым по результатам измерений.

Для оценки точности расположения голограммы в режиме дополненной реальности был разработан стенд, состоящий из трёх взаимно перпендикулярных плоскостей с миллиметровой разметкой. Его рабочая площадь составляла 400×400 мм. Конструкция собрана на металлическом каркасе с регулируемым смещением и наклоном каждой плоскости. Калибровку и регулировку положения плоскостей выполняли с помощью измерительных приборов: угольника и линейки высокого класса точности (рис. 10).

В основе алгоритма использования платформы лежит установка метки в основании системы координат платформы и визуализации сфер диаметром 1 мм на плоскостях платформы в AR-среде. После распознавания метки через очки

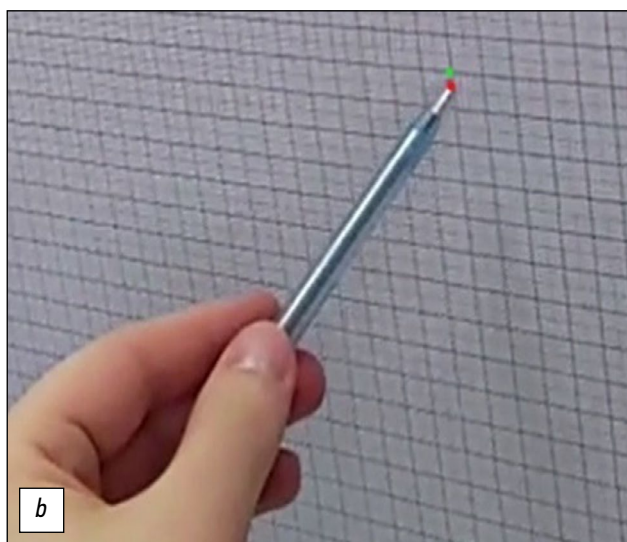
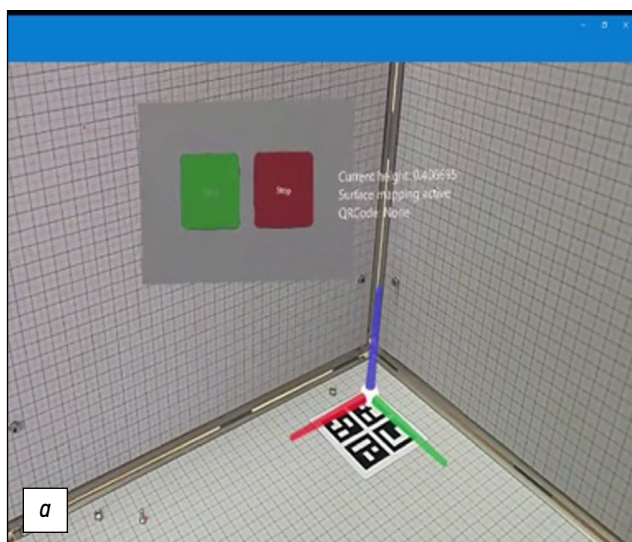


Рис. 11. Измерение точности системы дополненной реальности в условиях измерительного стенда: *a* — метка, установленная с помощью AR-очков; *b* — смещение отмеченных точек относительно заданных координат. Зелёная точка указывает на запланированное местоположение, красная точка указывает на фактическое местоположение, визуализируемое с помощью AR-очков.

смешанной реальности наблюдатель отмечает фактическое местоположение сферы на макете платформы. Точки располагаются на расстоянии 25 см от начала координат, что соответствует исходным координатам распознаваемого метки. В общей сложности было проведено 30 измерений. Измерения в каждой плоскости платформы проводили при разных положениях наблюдателя относительно метки, после чего сравнивали смещение (евклидово расстояние) отмеченных точек относительно заданных координат. Всего таких точек было девять, по три на каждой плоскости (рис. 11).

Разница в местоположении точек, определяемом в системе дополненной реальности и по результатам фактических измерений, была проверена вручную. Был проведён статистический анализ.

КЛИНИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ AR-ТЕХНОЛОГИИ В ЧЕЛЮСТНО-ЛИЦЕВОЙ ХИРУРГИИ

Отбор пациентов

Исследование проведено на базе кафедры стоматологии хирургической и челюстно-лицевой хирургии и отделения челюстно-лицевой хирургии Научно-исследовательского института стоматологии и челюстно-лицевой хирургии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета.

Критерии участия в исследовании

Критерии включения:

- пациенты мужского и женского пола;
- возраст ≥ 18 лет;
- наличие результатов КЛКТ в соответствии со стандартом создания, хранения, передачи и визуализации цифровых изображений DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine);
- наличие диагноза новообразования челюсти (доброкачественного), подтверждённого результатами гистологического исследования;
- наличие диагноза околокорневой кисты зуба, подтверждённого результатами гистологического исследования;
- присутствие инородного тела в ткани кости челюсти;
- наличие диагноза ретенированного зуба.

Критерии исключения:

- наличие системных заболеваний;
- беременность или грудное вскармливание;
- подвижность зубов III степени;
- злокачественные новообразования;
- клинические случаи, не подтверждённые результатами гистологического исследования;
- клинические случаи без данных КЛКТ.

Таблица 1. Диагнозы и пациенты

Диагноз	Количество пациентов	Процентное соотношение, %
Новообразование челюсти	18	45
Околокорневая киста зуба	11	27,5
Инородное тело в ткани кости челюсти	5	12,5
Ретенированный зуб	6	15
Всего	40	100

Распределение пациентов по нозологии представлено в табл. 1.

Мы использовали следующий алгоритм проведения клинического исследования.

1. Получение традиционных рентгенографических изображений (данные о 3D-объекте, DICOM-файл) и STL-файла по результатам интраорального сканирования.
2. Сегментация 3D-изображения зоны вмешательства (например, новообразования, кисты, зубы и инородные тела).
3. Цифровое планирование хирургического доступа к зоне вмешательства.
4. Загрузка изображения хирургического доступа и 3D-изображения зоны вмешательства в AR-очки.
5. Проведение операции в AR-среде с ориентацией на местоположение хирургического доступа и зоны вмешательства.
6. Анализ точности.
7. Оценка опыта использования системы AR-навигации с помощью опросника.
8. Статистический анализ.

Получение стандартных рентгенографических изображений (данные о 3D-объекте, DICOM-файл) и STL-файла по результатам интраорального сканирования

Сначала определяли клиническую ситуацию и получали цифровое изображение исключительно на основе результатов исследований высокого качества. При планировании вмешательства в AR-среде проводили рентгенографическое исследование с использованием рентгеноконтрастных меток, в соответствии с которым определяли местоположение AR-метки и выполняли её калибровку для проведения предполагаемого хирургического вмешательства. Для этой цели был изготовлен специальный держатель с AR-меткой и рентгеноконтрастными метками для верхней и нижней челюстей (рис. 12). Была выполнена КЛКТ с использованием одного из держателей. Предоперационная компьютерная томография (КТ) челюстей пациента выполнялась на томографе Planmeca (параметры: область сканирования 8×8 см; размер вокселя 200 мкм; вращение 270°, время экспозиции 12 с,

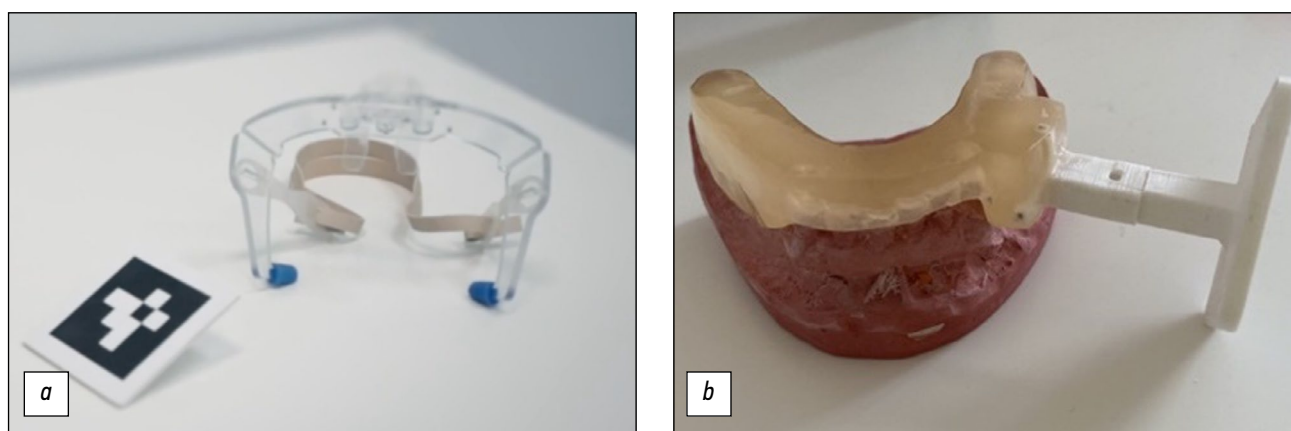


Рис. 12. Держатели с AR-метками: *a* — верхняя челюсть; *b* — нижняя челюсть.

напряжение трубки 90 кВ, сила тока 8,0 мА) для определения расположения интересующего объекта относительно анатомических структур.

Всем пациентам было проведено интраоральное сканирование с помощью сканера iTero 2. Изображения были экспортированы в формате STL и сопоставлены с КЛКТ-изображениями того же пациента.

1. Сегментация 3D-изображения зоны вмешательства (новообразования, кисты, зубы и инородные тела). Для сегментации изображений и создания 3D-моделей использовали специальное программное обеспечение Medgital Vision Editor, предназначенное для обработки медицинских 3D-изображений.

В программу загружали КЛКТ-изображения в формате DICOM и изображения, полученные методом оптического

сканирования на предоперационном этапе. После совмещения DICOM- и STL-файлов хирург определял зону вмешательства и начинал построение 3D-проекции. Зона вмешательства представляет собой область, в которой локализованы новообразования, кисты или ретенированные зубы. В зоне вмешательства предусматривали достаточное расстояние до всех прилежащих анатомических структур, таких как нервы и корни зубов. Следующим шагом была сегментация зоны вмешательства. Сегментацию изображения выполняли вручную или полуавтоматически (рис. 13).

Полученный файл с сегментированной зоной вмешательства сохраняли в формате STL.

2. Цифровое планирование хирургического доступа к зоне вмешательства. После сегментации зоны

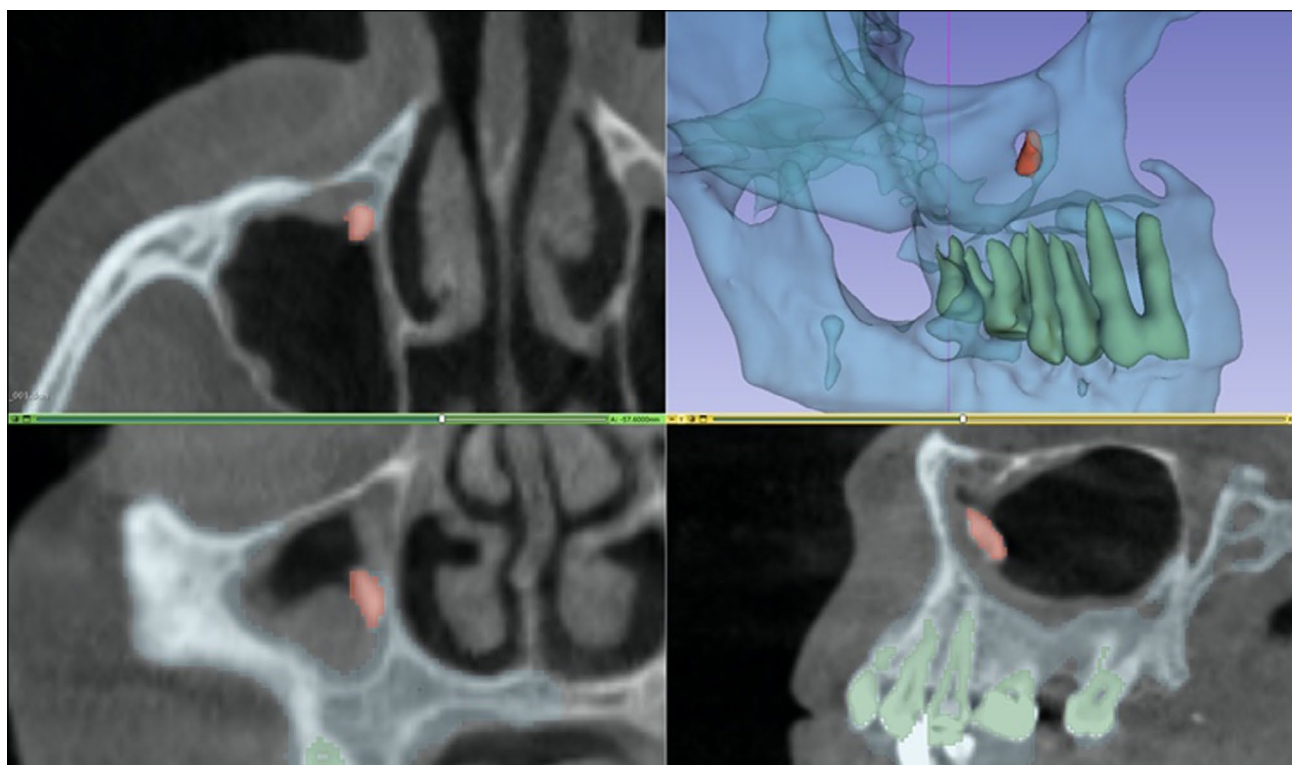


Рис. 13. Этап сегментации в программе Medgital Vision Editor (инородное тело в верхнечелюстной пазухе).

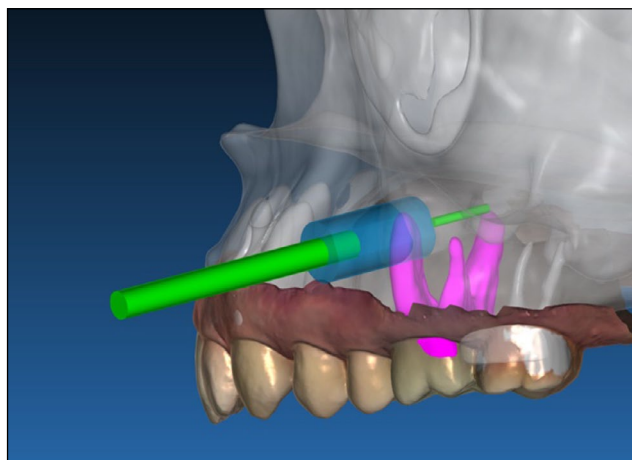


Рис. 14. Этап планирования хирургического доступа.

вмешательства хирург выбирал оптимальное местоположение хирургического доступа. Для этого использовали программу RealGuide 5.3, предназначенную для проведения операций по имплантации под визуализационным контролем. Однако вместо виртуальной установки зубного имплантата в требуемом положении виртуально помещали цилиндр, размер которого соответствовал внутреннему размеру трепанационного бора. Цилиндрический имплантат диаметром 5 мм виртуально устанавливали в месте планируемого хирургического доступа (рис. 14). В формате STL создавали и сохраняли виртуальный шаблон для сверления, обеспечивающий ориентацию трепанационного бора, наружный диаметр которого соответствовал цилиндрическому имплантату.

3. Загрузка изображения хирургического доступа и 3D-изображения зоны вмешательства в AR-очки. Полученные изображения в формате STL загружали в AR-очки Microsoft HoloLens 2 с использованием программы Medgital Vision Editor.

4. Проведение операции в AR-среде с учётом хирургического доступа и местоположения зоны вмешательства. При проведении операции использовали стерильную AR-метку. Метка была прикреплена к AR-держателю (подобного используемому при проведении КЛКТ). Метку 1 располагали в соответствии изображением сегментированного участка челюсти с выделенной

визуализационной меткой. Во время хирургического вмешательства и после фиксации AR-метки проверяли калибровку положения метки и проекции сегментированных объектов челюсти. К наконечнику бормашины прикрепляли метку 2. Проекцию костного трепана ориентировали на метку 2. После запуска приложения с помощью голосовой команды на первом этапе выполняли регистрацию местоположения челюсти и наконечника. После регистрации изображения зоны вмешательства и хирургического доступа накладывали на изображение челюсти пациента. При перемещении наконечника через очки HoloLens 2 отслеживали каждое движение бора. Операция проводилась под местной анестезией (рис. 15).

Послеоперационную КТ проводили с использованием тех же параметров, какие были установлены на предоперационном этапе. При этом для контроля хода хирургического вмешательства использовали тот же компьютерный сканер.

В программе RealGuide 5.3 для оценки точности навигационной системы было проведено сравнение результатов компьютерной томографии пациента до и после вмешательства (DICOM-файлы). В сформированное отверстие в кости устанавливали новый цилиндрический зубной имплантат диаметром 5 мм. Положение имплантата после вмешательства сравнивали с заданным положением. В программе вычисляли расхождение между заданным и фактическим хирургическим доступом.

Оценка опыта использования системы AR-навигации с помощью опросника

После проведения вмешательства хирурги заполняли индивидуальный опросник для оценки полученного опыта использования системы AR-навигации.

Опыт пользователя — это восприятие человеком фактически опробованных или ожидаемых продуктов, систем или услуг и реакция на них с учётом эмоционального профиля, убеждений, предпочтений, когнитивных способностей, физических/психологических реакций, поведения и достижений. Существуют различные механизмы исследования опыта использования.

Краткая версия опросника для оценки пользовательского опыта (short user experience questionnaire, UEQ-S)

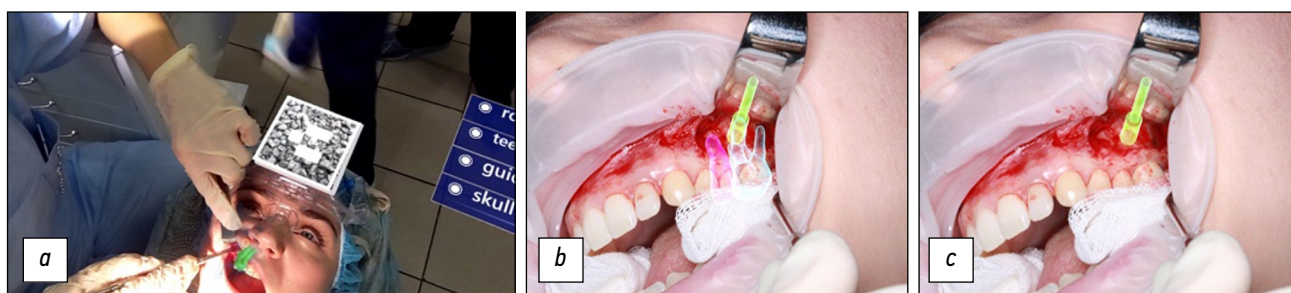


Рис. 15. Хирургическое вмешательство в системе AR-навигации: а — этап регистрации; б — визуализация зоны вмешательства и хирургического доступа; с — визуализация хирургического доступа.

Таблица 2. Вопросы краткой версии опросника UEQ-S для оценки пользовательского опыта

Привлекательность	Каково Ваше общее впечатление?
Понятность	Насколько легко прошло ознакомление с системой и обучение работе с ней?
Эффективность	Позволяет ли система быстро решать поставленные задачи без лишних усилий?
Надёжность	Надежна ли система, контролирует ли пользователь процесс работы с ней?
Мотивация	Вызывает ли процесс работы с системой энтузиазм и желание использовать её в дальнейшем?
Новизна	Является ли система инновационной и привлекающей внимание?

позволяет быстро и достоверно оценить впечатления от использования интерактивных продуктов, включая прагматический и гедонистический аспекты его качества. Прагматический аспект качества соответствует технической направленности восприятия — позволяет ли дизайн продукта, системы или услуги достичь целей, для которых их разрабатывали. Гедонистический аспект качества, напротив, соответствует факторам помимо технических, связанным с эмоциями пользователя (табл. 2).

Стандартизированный опросник состоит из 26 вопросов. По каждому вопросу были представлены две противоположных оценки, и участнику было предложено определить, на какой балл по шкале от 1 (полное согласие

с оценкой слева) до 7 (полное согласие с оценкой справа) он оценивает свои впечатления (рис. 16).

Все баллы, указанные участниками, были переведены на шкалу от –3 (чрезвычайно низкий показатель) до 3 (чрезвычайно высокий показатель). Нейтральное отношение соответствовало оценке в диапазоне от –0,8 до 0,8, при этом балл >0,8 свидетельствовал о положительных впечатлениях, а <–0,8 — об отрицательных.

Статистический анализ

Для описания переменных использовались среднее значение и стандартное отклонение (СО). Кроме того, для оценки истинных значений исследуемых параметров были рассчитаны 95% доверительные интервалы (ДИ).



Рис. 16. 26 вопросов, включенных в опросник UEQ.

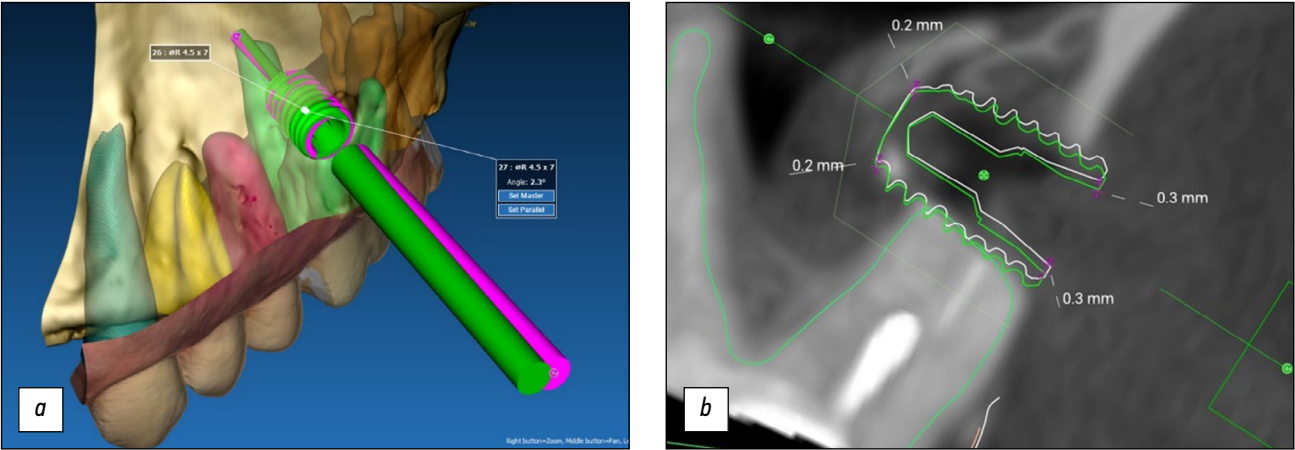


Рис. 17. Угловое отклонение между заданным и фактическим хирургическим доступом: *a* — трёхмерная визуализация смещения, где зелёным отмечен достигнутый хирургический доступ, розовым — запланированный; *b* — фронтальный срез, запланированный хирургический доступ (отмечено белым), достигнутый (отмечено зелёным).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментального исследования точности работы системы AR-навигации в челюстно-лицевой хирургии

В ходе экспериментов мы успешно оценили различия между дополненной реальностью и реальными объектами. Среднее значение FRE составило 0,9 мм (CO=0,7 мм; 95% ДИ: 0,4–1,3 мм). Значение TRE составило 1,3 мм (CO=0,5 мм; 95% ДИ: 1,1–1,5 мм). Величина FLE была наиболее значительной и составила 2,2 мм (CO=0,9; 95% ДИ: 1,9–2,5 мм). Таким образом, манипулирование голограммой и управление ею с помощью жестов было возможным при любых значениях угла и расстояния. Голограммы при перемещении по ним демонстрировали незначительный дрейф (диапазон 1–2 мм).

Результаты клинического исследования применения системы AR-навигации в челюстно-лицевой хирургии

Результаты проверки точности работы навигационной системы. Среднее угловое отклонение (в градусах) хирургического доступа после применения системы AR-навигации составило 2,5°. При проведении

хирургического вмешательства в области боковых зубов угловое отклонение было несколько выше (рис. 17).

Результаты заполнения опросника UEQ. Для оценки личных впечатлений после каждого вмешательства хирурги заполняли опросник UEQ. В табл. 3 и на рис. 18 приведены результаты применения системы AR-навигации по шести критериям.

Значения >0,8 соответствуют положительной оценке. Очевидно, что по всем критериям система получила исключительно положительную оценку.

На рис. 19 показаны результаты оценки по всем 26 элементам опросника UEQ. В пункте 4 (систему сложно/легко освоить) указано отрицательное среднее значение, в то время как по всем остальным пунктам опросника приведены высокие положительные средние значения. Это указывает на возможную проблему по данному аспекту.

Средние показатели прагматического и гедонистического аспектов качества при оценке опыта использования составили 1,1 (CO=0,5; 95% ДИ: 0,9–1,3 мм) и 2,2 (CO=0,3; 95% ДИ: 2,1–2,3 мм) (рис. 20), что свидетельствует о довольно благоприятной оценке.

Общий показатель составил 1,7 (CO=0,4; 95% ДИ: 1,5–1,8 мм). Это означает, что у хирургов сложилось положительное впечатление от использования системы.

Таблица 3. Опросник UEQ для оценки опыта использования системы AR-навигации при проведении вмешательств в челюстно-лицевой хирургии

Критерий	Среднее значение	Стандартное отклонение	Доверительный интервал
Привлекательность	2,1	0,4	2,0–2,2
Понятность	0,6	0,7	0,4–0,8
Эффективность	1,3	0,4	1,2–1,4
Надёжность	1,7	0,8	1,4–1,9
Мотивация	1,9	0,3	1,8–2,0
Новизна	2,5	0,4	2,4–2,6

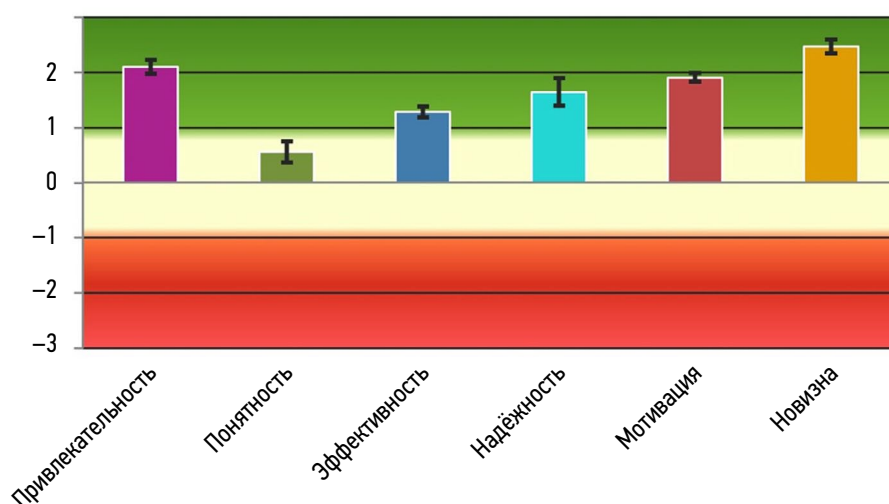


Рис. 18. Опросник UEQ для оценки опыта использования системы AR-навигации при проведении вмешательств в челюстно-лицевой хирургии.

Результаты сравнительного анализа по критериям опросника UEQ. В ходе сравнительного анализа проводится оценка продукта по пяти категориям (по каждому критерию).

1. *Отлично*: среднее значение входит в 10% самых высоких оценок.
2. *Хорошо*: 10% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 75% результатов — хуже.
3. *Выше среднего*: 25% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 50% результатов — хуже.
4. *Ниже среднего*: 50% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 25% результатов — хуже.
5. *Плохо*: среднее значение входит в 25% самых низких оценок.

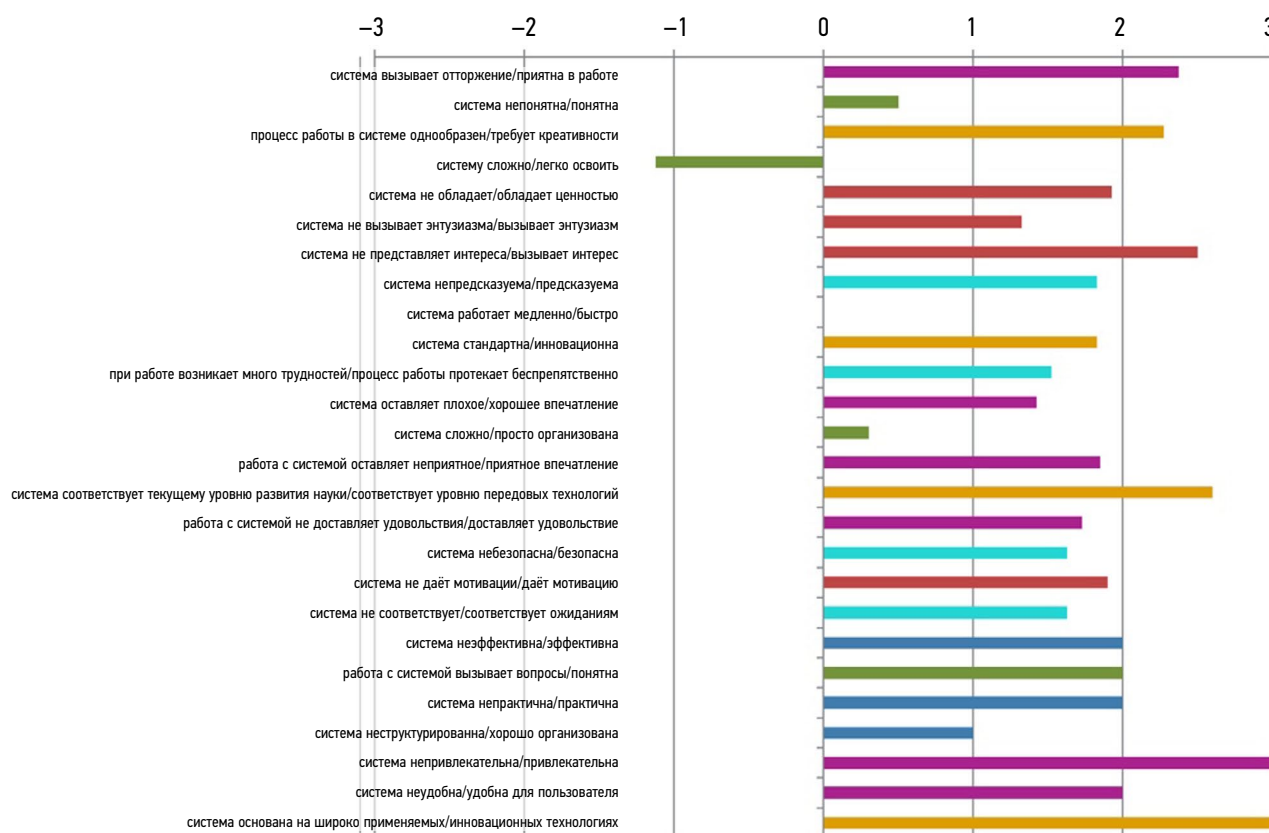


Рис. 19. Результаты оценки по всем 26 пунктам опросника UEQ.

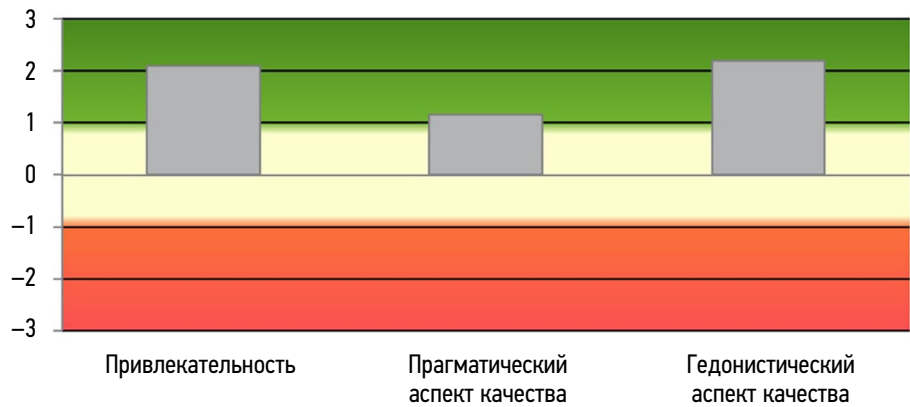


Рис. 20. Оценка прагматического и гедонистического аспектов качества, а также общего впечатления от использования.

На сравнительном графике, построенном в программе Excel, показан уровень пользовательского опыта (UX) при применении исследуемого продукта.

Результаты сравнительного анализа по критериям представлены в табл. 4 и рис. 21.

Результаты сравнительного анализа показателей оценки с помощью опросника UEQ показали, что продукт в целом обладает высоким прагматическим качеством.

Понятность: среднее значение входит в 25% самых низких оценок.

Эффективность: 25% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 50% результатов — хуже.

Надёжность: 10% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 75% результатов — хуже, в то время

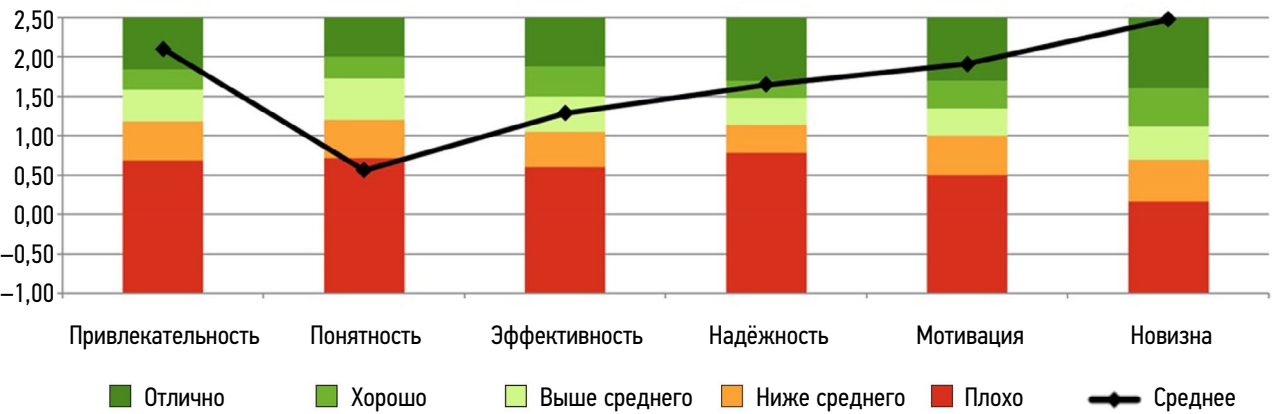


Рис. 21. Сравнительный график показателей системы AR-навигации для проведения вмешательств в челюстно-лицевой хирургии.

Таблица 4. Сравнительный анализ показателей системы AR-навигации для проведения вмешательств в челюстно-лицевой хирургии

Критерий	Среднее значение	Сравнительный анализ	Интерпретация
Привлекательность	2,10	Отлично	Среднее значение входит в 10% самых высоких оценок
Понятность	0,56	Плохо	Среднее значение входит в 25% самых низких оценок
Эффективность	1,29	Выше среднего	25% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 50% результатов — хуже
Надёжность	1,65	Хорошо	10% результатов, включённых в сравнительный анализ, выше средних показателей исследуемого продукта, а 75% результатов — хуже
Мотивация	1,91	Отлично	Среднее значение входит в 10% самых высоких оценок
Новизна	2,48	Отлично	Среднее значение входит в 10% самых высоких оценок

как оценка гедонистического аспекта качества была отличной (среднее значение входит в 10% самых высоких оценок). Для сравнения, впечатления о гедонистическом аспекте качества были заметно выше, чем о прагматическом.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем исследовании был проведен анализ точности работы системы AR-навигации с использованием AR-очков HoloLens 2 и редактора Medgital Vision Editor при выполнении вмешательств в челюстно-лицевой хирургии. Погрешность расположения голограмм можно оценить непосредственно на лице пациента при совмещении с соответствующей голограммой в условиях постоянной визуализации местоположения голограммы относительно лица пациента.

Несмотря на относительно небольшое количество измерений, было установлено, что система AR-навигации обладает достаточной точностью для клинического применения, однако требует усовершенствований. При применении современных методов измерения точности FLE должна составлять <2 мм.

Высокие показатели в опроснике UEQ объяснялись новизной системы AR-навигации в челюстно-лицевой хирургии и энтузиазмом от её использования. Прагматический аспект качества соответствует технической направленности восприятия, то есть достижению целей, для которых разрабатывались продукт, система или услуга.

Ожидалось, что эффективность системы будет несколько выше, однако полученные показатели связаны с техническими трудностями, возникшими при реализации в системе новой технологии дополненной реальности. Самые низкие оценки получили параметры скорости и организации процедуры.

По нашему мнению, это объясняется проведением процедуры в несколько этапов: получение рентгенографического изображения, его анализ, ручная сегментация зоны вмешательства, загрузка информации о зоне вмешательства в AR-очки, правильная калибровка и настройка системы в ходе операции.

Кроме того, был выполнен анализ этапов, которые получили самые низкие оценки по указанным параметрам. Самые низкие оценки пользователи поставили при выполнении хирургических вмешательств на дистальных отделах нижней челюсти. При выполнении хирургических вмешательств на нижней челюсти требуется индивидуальная каппа с зафиксированной AR-меткой, что увеличивает время подготовки данных для анализа. Проведение хирургического вмешательства на дистальных отделах нижней челюсти потребовало больше времени на подготовку и настройку оборудования.

Таким образом, требуется усовершенствовать систему подготовки данных для интраоперационной навигации, ускорить процедуру анализа рентгенологических данных,

возможно, с помощью искусственного интеллекта, сократить время на сегментацию зоны вмешательства за счёт автоматической сегментации данных.

Регистрация данных на нижней челюсти всегда представляет более сложную процедуру, чем на верхней, из-за подвижности нижней челюсти и расположения AR-метки непосредственно в зоне операции. В ходе дальнейших исследований планируется использовать технологию навигации без меток, что позволит сократить время, необходимое для интраоперационной настройки системы.

Гедонистический аспект качества соответствует факторам помимо технических, то есть связанным с эмоциями пользователя. Высокие показатели гедонистического аспекта качества в опроснике UEQ объяснялись новизной системы AR-навигации в челюстно-лицевой хирургии и энтузиазмом по поводу ее использования.

До полного внедрения программного обеспечения важно выполнить оценку пользовательского опыта. Опросник UEQ содержит вопросы, позволяющие выполнить оценку удобства использования. Данная концепция сочетает в себе комплексную оценку эффективности, производительности, эстетических аспектов, удобства использования и привлекательности. Как показывает сравнительный анализ результатов заполнения опросника UEQ, у пользователей сложилось благоприятное впечатление от использования продукта. Впечатления о гедонистическом аспекте качества были значительно выше, чем о прагматическом. В дальнейшем необходимо доработать прототип с целью его усовершенствования и повышения показателей прагматического аспекта качества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Судя по результатам заполнения опросника UEQ, у хирургов сложился достаточно положительный опыт использования системы AR-навигации при проведении вмешательств в челюстно-лицевой хирургии. На следующем этапе предполагается провести анализ эффективности использования данной технологии для повышения качества хирургических вмешательств.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда по соглашению № 23-21-00349.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределён следующим образом: А.В. Лысенко — концепция и дизайн исследования, сбор и анализ литературных данных, написание текста рукописи; А.И. Яременко, В.М. Иванов — научное редактирование рукописи; А.Ю. Смирнов, А.А. Прокофьева — сбор и анализ литературных данных, написание текста рукописи; А.И. Любимов — сбор и анализ литературных данных, написание и редактирование рукописи; К.С.М. Иззard — редактирование рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. The research was carried out with the support of the Russian Science Foundation under agreement No. 23-21-00349.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 science in dentistry*. 2022. Vol. 52, N 2. P. 225–230. doi: 10.5624/isd.20210256
2. Лысенко А.В., Разумова А.Я., Яременко А.И. Применение технологии дополненной реальности в качестве навигационной системы при эндовидеоассоциированном удалении кисты верхней челюсти // *Стоматология*. 2022. Т. 101, № 5. С. 17–21. EDN: FEOJE doi: 10.17116/stomat202210105117
3. Bussink T., Maal T., Meulstee J., Xi T. Augmented reality guided condylectomy // *British journal of oral and maxillofacial surgery*. 2022. Vol. 60, N 7. P. 991–993. doi: 10.1016/j.bjoms.2022.01.008
4. Shi J., Liu S., Zhu Z., et al. Augmented reality for oral and maxillofacial surgery: The feasibility of a marker-free registration method // *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery*. 2022. Vol. 18, N 4. P. e2401. doi: 10.1002/rcs.2401
5. Brockmeyer P., Wiechens B., Schliephake H. The Role of Augmented Reality in the Advancement of Minimally Invasive Surgery Procedures: A Scoping Review // *Bioengineering (Basel)*. 2023. Vol. 10, N 4. P. 501. doi: 10.3390/bioengineering10040501

REFERENCES

1. 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 science in dentistry*. 2022;52(2):225–230. doi: 10.5624/isd.20210256
2. Lysenko AV, Razumova AY, Yaremenko AI, et al. The use of augmented reality technology in endoscopic removal of a maxillary cyst. *Dentistry = Stomatologija*. 2022;101(5):17–21. EDN: FEOJE doi: 10.17116/stomat202210105117
3. Bussink T, Maal T, Meulstee J, Xi T. Augmented reality guided condylectomy. *British journal of oral and maxillofacial surgery*. 2022;60(7):991–993. doi: 10.1016/j.bjoms.2022.01.008
4. Shi J, Liu S, Zhu Z, et al. Augmented reality for oral and maxillofacial surgery: The feasibility of a marker-free registration method. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery*. 2022;18(4):e2401. doi: 10.1002/rcs.2401

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

A.I. Yaremenko, V.M. Ivanov — scientific editing of the manuscript; A.Yu. Smirnov, A.A. Prokofieva — collection and analysis of literary data, writing the manuscript; A.I. Lyubimov — collection and analysis of literary data, writing and editing the manuscript; K.S.M. Izzard — editing the manuscript.

6. Van Gestel F., Frantz T., Buyck F., et al. Neuro-oncological augmented reality planning for intracranial tumor resection // *Frontiers in Neurology*. Vol. 14. P. 1104571. doi: 10.3389/fneur.2023.1104571
7. Farronato M., Maspero C., Lanteri V., et al. Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature // *BMC Oral Health*. 2019. Vol. 19, N 1. P. 135. doi: 10.1186/s12903-019-0808-3
8. Stucki J., Dastgir R., Baur D.A., Quereshy F.A. The use of virtual reality and augmented reality in oral and maxillofacial surgery: A narrative review // *Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology*. 2024. Vol. 137, N 1. P. 12–18. doi: 10.1016/j.oooo.2023.07.001
9. Cipresso P., Giglioli I.A.C., Raya M.A., Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature // *Frontiers in Psychology*. 2018. Vol. 9. P. 2086. doi: 10.3389/fpsyg.2018.02086
10. Yeung A.W.K., Tosevska A., Klager E., et al. Virtual and Augmented Reality Applications in Medicine: Analysis of the Scientific Literature // *Journal of medical Internet research*. 2021. Vol. 23, N 2. P. e25499. doi: 10.2196/25499

5. Brockmeyer P, Wiechens B, Schliephake H. The Role of Augmented Reality in the Advancement of Minimally Invasive Surgery Procedures: A Scoping Review. *Bioengineering (Basel)*. 2023;10(4):501. doi: 10.3390/bioengineering10040501
6. Van Gestel F, Frantz T, Buyck F, et al. Neuro-oncological augmented reality planning for intracranial tumor resection. *Frontiers in Neurology*. 14:1104571. doi: 10.3389/fneur.2023.1104571
7. Farronato M, Maspero C, Lanteri V, et al. Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature. *BMC Oral Health*. 2019;19(1):135. doi: 10.1186/s12903-019-0808-3
8. Stucki J, Dastgir R, Baur DA, Quereshy FA. The use of virtual reality and augmented reality in oral and maxillofacial surgery: A narrative review. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology*. 2024;137(1):12–18. doi: 10.1016/j.oooo.2023.07.001

9. Cipresso P, Giglioli IAC, Raya MA, Riva G. The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*. 2018;9:2086. doi: 10.3389/fpsyg.2018.02086

10. Yeung AWK, Tosevska A, Klager E, et al. Virtual and Augmented Reality Applications in Medicine: Analysis of the Scientific Literature. *Journal of medical Internet research*. 2021;23(2):e25499. doi: 10.2196/25499

ОБ АВТОРАХ

*** Прокофьева Алина Аркадьевна;**

адрес: Россия, 197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, 6/8;
ORCID: 0000-0002-7461-4633;
eLibrary SPIN: 9206-3829;
e-mail: prokofevaalina@mail.ru

Лысенко Анна Валерьевна, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-5625-1085;
eLibrary SPIN: 1296-1399;
e-mail: lysenko.anna@mail.ru

Яременко Андрей Ильич, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0002-7700-7724;
eLibrary SPIN: 7903-8540;
e-mail: ayaremenko@me.com

Иванов Владимир Михайлович, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0001-8194-2718;
eLibrary SPIN: 8738-1873;
e-mail: voliva@rambler.ru

Смирнов Антон Юрьевич;

ORCID: 0009-0001-2440-2499;
eLibrary SPIN: 3559-3318;
e-mail: ant.suyr@gmail.com

Любимов Александр Иванович, канд. мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0002-7872-9593;
eLibrary SPIN: 1118-9920;
e-mail: a-drlyubimov@mail.ru

Izzard Charles S. M.;

ORCID: 0009-0007-5893-1448;
e-mail: charles.izzard@btinternet.com

AUTHORS' INFO

*** Alina A. Prokofeva;**

address: 6/8, Lev Tolstoy street, 197022 Saint Petersburg, Russia;
ORCID: 0000-0002-7461-4633;
eLibrary SPIN: 9206-3829;
e-mail: prokofevaalina@mail.ru

Anna V. Lysenko, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0001-5625-1085;
eLibrary SPIN: 1296-1399;
e-mail: lysenko.anna@mail.ru

Andrei I. Yaremenko, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0002-7700-7724;
eLibrary SPIN: 7903-8540;
e-mail: ayaremenko@me.com

Vladimir M. Ivanov, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0001-8194-2718;
eLibrary SPIN: 8738-1873;
e-mail: voliva@rambler.ru

Anton Yu. Smirnov;

ORCID: 0009-0001-2440-2499;
eLibrary SPIN: 3559-3318;
e-mail: ant.suyr@gmail.com

Alexandr I. Lyubimov, MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0002-7872-9593;
eLibrary SPIN: 1118-9920;
e-mail: a-drlyubimov@mail.ru

Charles S. M. Izzard;

ORCID: 0009-0007-5893-1448;
e-mail: charles.izzard@btinternet.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author