

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

Возможности применения технологий виртуальной и дополненной реальности в современной кардиологии и кардиохирургии

С.С. Рашидова¹, Э.А. Бдоян², М.М. Тимурзиева³, С.А. Лобановская³, В.В. Наumenко²,
А.В. Рахманова², В.Д. Тимофеева⁴, А.С. Гуцуляк⁵, А.А. Зайнуллин⁵, К.Р. Узбекова⁵,
В.А. Харитонов⁵, Н.Ф. Ахметова⁵

¹ Перинатальный центр г. Хасавюрта, Хасавюрт, Россия;

² Ростовский государственный медицинский университет, Ростов-на-Дону, Россия;

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова, Москва, Россия;

⁴ Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия;

⁵ Башкирский государственный медицинский университет, Уфа, Россия

АННОТАЦИЯ

Технологические инновации произвели революцию в медицинской практике, особенно в области кардиохирургии, где сложный характер вмешательств требует точности и предусмотрительности. Использование виртуальной и дополненной реальности в этой области открывает огромные перспективы для улучшения предоперационного планирования, повышения качества медицинского образования и, в конечном счёте, улучшения результатов лечения пациентов.

В данном обзоре проанализирована литература, посвящённая роли виртуальной и дополненной реальности в современной кардиологии, а также обсуждаются возможные направления развития данной области.

В результате поиска извлечено 3858 публикаций из PubMed/MEDLINE, 69 публикаций из eLibrary и 1115 публикаций, найденных с помощью Google Scholar. Поисковые запросы включали следующие ключевые слова и их сочетания: виртуальная реальность; дополненная реальность; кардиология; кардиохирургия; virtual reality; augmented reality; cardiology; cardiac surgery. Временной интервал поиска: с момента основания соответствующих баз данных по май 2024 года.

Современная кардиологическая помощь включает в себя всё более сложные процедуры, требующие высокого уровня квалификации. Виртуальная реальность становится мощным инструментом как для предпроцедурного планирования, так и для образовательных мероприятий. Она открывает новые возможности для обучения и подготовки специалистов в области кардиологии. С её помощью можно создавать реалистичные симуляции различных ситуаций, с которыми врачи могут столкнуться в своей работе. Это позволяет обучающимся получить практический опыт без риска для реальных пациентов. Интеграция виртуальной реальности в кардиологическую практику имеет большой потенциал, однако для этого необходимо решить ряд проблем. Следует разработать стандарты безопасности и эффективности использования виртуальной реальности в медицинских целях. Также необходимо провести дополнительные исследования, чтобы оценить долгосрочные последствия её использования для здоровья пациентов.

Ключевые слова: искусственный интеллект; виртуальная реальность; дополненная реальность; кардиология; визуализация; обучение.

Как цитировать:

Рашидова С.С., Бдоян Э.А., Тимурзиева М.М., Лобановская С.А., Наumenко В.В., Рахманова А.В., Тимофеева В.Д., Гуцуляк А.С., Зайнуллин А.А., Узбекова К.Р., Харитонов В.А., Ахметова Н.Ф. Возможности применения технологий виртуальной и дополненной реальности в современной кардиологии и кардиохирургии // Digital Diagnostics. 2024. Т. 5, № 4. С. 819–832. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

Potential use of virtual and augmented reality technologies in modern cardiology and cardiac surgery

Seda S. Rashidova¹, Emma A. Bdoyan², Madina M. Timurzieva³, Sofya A. Lobanovskaya³, Valeria V. Naumenko², Angelina V. Rakhmanova², Valeriya D. Timofeeva⁴, Alexey S. Gutsulyak⁵, Artem A. Zainullin⁵, Karina R. Uzbekova⁵, Valeriya A. Kharitonova⁵, Narina F. Akhmetova⁵

¹ Khasavyurt Perinatal Center, Khasavyurt, Russia;

² Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia;

³ Pirogov Russian National Research Medical University, Russia;

⁴ Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

⁵ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

ABSTRACT

Innovative technologies have dramatically changed medical practice, particularly in cardiac surgery, which requires precision and caution due to the challenging nature of procedures. The use of virtual reality (VR) and augmented reality (AR) in this area has great potential to improve surgical planning, medical education and patient outcomes.

This review analyzes the literature on the role of VR and AR in modern cardiology and discusses possible directions for their development.

The search retrieved 3,858 publications from PubMed/MEDLINE, 69 publications from eLibrary, and 1,115 publications from Google Scholar. Searches included the following keywords and combinations thereof: virtual reality; augmented reality; cardiology; cardiac surgery. Publications were searched from the time the relevant databases were created to May 2024.

Cardiac care today involves increasingly sophisticated procedures that require a high level of expertise. VR becomes a powerful tool for both surgical planning and education. It opens new opportunities for educating and training cardiologists. It can be used to create realistic simulations of situations healthcare professionals may encounter in their practice. Students are able to gain hands-on experience with no risk to real patients. Integrating virtual reality into cardiology practice has great potential, but several issues need to be addressed. Standards for safety and efficacy of the medical use of virtual reality should be developed. Further research is also needed to assess the long-term health effects of VR use on patients.

Keywords: artificial intelligence; virtual reality; augmented reality; cardiology; imaging; training.

To cite this article:

Rashidova SS, Bdoyan EA, Timurzieva MM, Lobanovskaya SA, Naumenko VV, Rakhmanova AV, Timofeeva VD, Gutsulyak AS, Zainullin AA, Uzbekova KR, Kharitonova VA, Akhmetova NF. Potential use of virtual and augmented reality technologies in modern cardiology and cardiac surgery. *Digital Diagnostics*. 2024;5(4):819–832. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

在现代心脏病学和心脏外科中应用虚拟现实和增强现实技术的可能性

Seda S. Rashidova¹, Emma A. Bdoyan², Madina M. Timurzieva³, Sofya A. Lobanovskaya³, Valeria V. Naumenko², Angelina V. Rakhmanova², Valeriya D. Timofeeva⁴, Alexey S. Gutsulyak⁵, Artem A. Zainullin⁵, Karina R. Uzbekova⁵, Valeriya A. Kharitonova⁵, Narina F. Akhmetova⁵

¹ Khasavyurt Perinatal Center, Khasavyurt, Russia;

² Rostov State Medical University, Rostov-on-Don, Russia;

³ Pirogov Russian National Research Medical University, Russia;

⁴ Academician I.P. Pavlov First St. Petersburg State Medical University, Saint Petersburg, Russia;

⁵ Bashkir State Medical University, Ufa, Russia

摘要

技术创新彻底改变了医疗实践，特别是在心脏外科领域，干预的复杂性需要精确性和预见性。虚拟现实和增强现实在该领域的应用，对于改善术前规划、提高医学教育质量，并最终改善患者治疗效果，具有巨大的前景。

本综述分析了虚拟现实和增强现实在现代心脏病学中的作用的文献，并讨论了该领域可能的发展方向。

最终从PubMed/MEDLINE检索到3858篇发表文章，从 eLibrary检索到69篇发表文章，并使用 Google Scholar检索到1115篇发表文章。搜索查询包括以下关键词及其词组：虚拟现实；增强现实；心脏病学；心脏外科；virtual reality; augmented reality; cardiology; cardiac surgery。检索时间间隔：自各数据库建库至2024年5月。

现代心脏护理，包括日益复杂的程序，需要高水平的专业知识。虚拟现实正在成为程序前规划和教育活动的强大工具。它为心脏病学教育和培训提供了新的可能性。它可对医生在工作中可能遇到的各种情况进行真实的模拟。这使得学员能够获得实践经验，而真正的患者无需承担风险。将虚拟现实融入心脏病学实践具有巨大潜力，但为此必须解决许多问题。应制定将虚拟现实技术用于医疗目的的虚拟现实的安全性和有效性的标准。还需要进一步的研究来评估其使用对患者健康的长期影响。

关键词：人工智能；虚拟现实；增强现实；心脏病学；可视化；学习。

引用本文：

Rashidova SS, Bdoyan EA, Timurzieva MM, Lobanovskaya SA, Naumenko VV, Rakhmanova AV, Timofeeva VD, Gutsulyak AS, Zainullin AA, Uzbekova KR, Kharitonova VA, Akhmetova NF. 在现代心脏病学和心脏外科中应用虚拟现实和增强现实技术的可能性. *Digital Diagnostics*. 2024;5(4):819–832. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD635577>

收到: 01.09.2024

接受: 25.09.2024

发布日期: 05.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

В современном здравоохранении одним из глобальных трендов развития является использование виртуальной, дополненной и смешанной реальности [1]. Виртуальная реальность (VR — virtual reality) — это визуализация цифровой информации в трёх измерениях, которая представляет собой компьютерную имитацию объектов реального или физически не существующего мира. Технология VR была изобретена в 1950-х годах [2], а в 1980-х годах появились значительные достижения, открывшие путь для обширных доклинических исследований [3]. Примечательно, что внедрение в 1980-х годах наголовного дисплея с фронтальным экраном, именуемого также VR-шлемом, стало поворотным моментом, позволившим улучшить визуализацию во время медицинских процедур [4]. К.Н. Cho и соавт. [5] провели исследование, в котором показано, как очки внутри гарнитуры генерируют 3D-изображение во время процедуры при непрерывном движении руки вперёд/назад у пациентов с двигательными нарушениями верхних конечностей после инсульта.

В свою очередь дополненная реальность (AR — augmented reality) отличается плавным сочетанием виртуальных элементов с реальностью. В отличие от VR, которая полностью погружает пользователей в имитируемую цифровую реальность, AR интегрирует виртуальную информацию в окружение пользователя. Функции дополненной реальности реализуются с помощью смартфонов, планшетов и устройств, устанавливаемых на голову, оснащённых очками или проекторами, передающими виртуальные изображения непосредственно в реальный мир [6–8]. Это отличие создаёт основу для изучения уникальных свойств как виртуальной, так и дополненной реальности в контексте совершенствования процедур кардиохирургии.

Технологические инновации произвели революцию в медицинской практике, особенно в области

кардиохирургии, где сложный характер вмешательств требует точности и предусмотрительности. Использование VR и AR в этой области открывает огромные перспективы для улучшения предоперационного планирования, повышения качества медицинского образования и, в конечном счёте, улучшения результатов лечения пациентов.

Методология поиска

Оценка статей проводилась в соответствии с рекомендациями PRISMA. Алгоритм отбора исследований представлен на рис. 1.

В результате поиска извлечено 3858 публикаций из PubMed/MEDLINE, 69 публикаций из eLibrary и 1115 публикаций, найденных с помощью Google Scholar. Поисковые запросы включали следующие ключевые слова и их сочетания: виртуальная реальность; дополненная реальность; кардиология; кардиохирургия; virtual reality; augmented reality; cardiology; cardiac surgery. Временной интервал поиска: с момента основания соответствующей базы данных по май 2024 года. Независимо друг от друга все авторы проводили скрининг названий и аннотаций выявленных статей, при обнаружении релевантных исследований извлекался полный текст соответствующей статьи. Дубликаты и неполнотекстовые версии статей исключены. Полнотекстовые версии статей оценивались на предмет соответствия следующим критериям включения:

- работа опубликована на английском или русском языках;
- работа опубликована в рецензируемом научном издании;
- работа представляет собой обзор литературы, экспериментальное или клиническое исследование, содержащее указанные ключевые слова.

После процедуры отбора в обзор включено 55 статей.

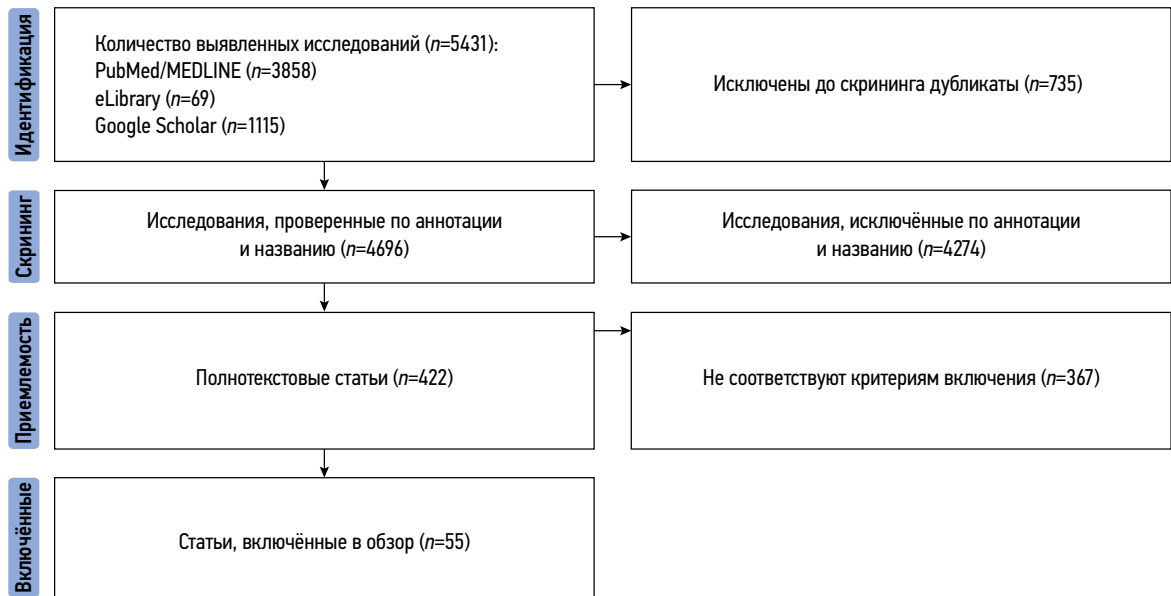


Рис. 1. Алгоритм поиска исследований.

РОЛЬ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ИНТЕРВЕНЦИОННОЙ КАРДИОЛОГИИ

Перипроцедурные технологии VR и AR — это современные технологии, которые позволяют визуализировать анатомическую структуру в 3D для пред- и послеоперационного планирования. VR позволяет рентгенохирургам изучать сложную анатомию в виртуальном мире [9, 10], в то время как AR помогает проецировать цифровые данные на пациента как до, так и после операции. В. Rymuza и соавт. [11] описали предварительное применение CarnaLife Holo (MedApp, Польша) у пациента со стенозом двустворчатого аортального клапана. Рентгенохирурги смогли увидеть трёхмерную голограмму сердца во время успешной процедуры транскатетерной замены аортального клапана (Transcatheter aortic valve replacement, TAVR). Как VR, так и AR-технологии позволяют имитировать этапы структурных вмешательств на сердце, таких как TAVR, клапанные вмешательства или врождённые пороки сердца [12–14]. Эндоваскулярная окклюзия ушка левого предсердия (УЛП), электрофизиологическая абляция и TAVR являются сложными вмешательствами, требующими глубокого понимания анатомических особенностей сердца [15]. Процедуру TAVR можно смоделировать, создав индивидуальные модели и определив оптимальную зону установки аортального клапана. При определении данной зоны может учитываться несколько факторов, в том числе морфология клапана и кальциноз, предполагаемые расстояния до соответствующих структур при нарушениях сердечной проводимости, а также устья коронарных артерий, которые помогают при других вмешательствах, таких как окклюзия УЛП или трансаортальная реконструкция задней створки митрального клапана. В этих случаях вмешательства на митральном клапане могут быть практически спланированы с учётом точного местоположения трансептальной пункции [16]. VR-симулятор позволяет избрать оптимальную тактику оперативного вмешательства, что приведёт к снижению риска формирования фатальных осложнений, таких как перфорация аорты, разрушение аппарата митрального клапана, обструкция выводящего тракта левого желудочка или повреждение коронарных артерий. Рентгенохирурги объединяют информацию, полученную при рентгеноскопии в режиме реального времени, для регистрации анатомических деталей тела пациента и, возможно, используют альтернативные методы визуализации, такие как предпроцедурная компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) сердца и эхокардиография. Это также может быть эффективным при проведении перикардиоцентеза и электрофизиологических процедур [17].

Помимо преимуществ VR для врачей, необходимо отметить возможность её использования для увеличения комфорта пациентов в процессе проводимой терапии.

Так, иммерсивная VR генерирует положительные эмоции и улучшает настроение, синхронизируя и стабилизируя электронные импульсы в префронтальной коре, что уменьшает болевые ощущения и беспокойство пациента [18]. Тем не менее в нескольких исследованиях с совершенно разными приложениями и разнообразным мультимедийным контентом оценивалось влияние VR на интервенционные кардиологические процедуры.

В исследовании, проведённом М. Keshvari и соавт. [19], показано, что 5-минутное VR погружение с естественными сценариями и звуками, включая тихую музыку, пение птиц и звуки водопада, перед процедурой коронароангиографии (КГА) помогло снизить тревожность, согласно опроснику State-Trait Anxiety Inventory (STAI), со значимыми различиями от контрольной группы, получавшей стандартное лечение. Кроме того, авторы продемонстрировали, что 5-минутное воздействие VR помогло стабилизировать частоту сердечных сокращений и артериальное давление.

Исследование, проведённое J.J. Aardoom и соавт. [20], показало, что использование пациентами обучающего контента, введённого за 1 или 2 недели до КГА, может снизить беспокойство, связанное с процедурой. С помощью VR гарнитуры, используемой в домашних условиях или в условиях стационара, пациенты могли виртуально отслеживать день оперативного вмешательства, включая все этапы, начиная с момента поступления в больницу и заканчивая послеоперационным периодом. Во время данного обучения затронуты различные темы, касающиеся процесса оказания медицинской помощи, такие как правила поведения в палате, необходимая одежда, кто может находиться рядом с пациентом, а также медикаментозные препараты, которые назначают после операции. Пациенты могли полноценно взаимодействовать с аватарами в виде медицинских работников, чтобы получать актуальную информацию на каждом этапе. Весь виртуальный опыт длился приблизительно 20 минут, но, вероятно, варьировал в зависимости от времени, проведённого пациентом в каждом модуле.

Исследование Н. Morgan и соавт. [21] показало значительно большее снижение тревожности у пациентов, которым проводили 10-минутный образовательный курс VR перед КГА, иллюстрирующий предпроцедурную фазу и саму процедуру, по сравнению с пациентами из группы контроля. Опытная группа также лучше понимала саму процедуру и была более удовлетворена по сравнению с пациентами контрольной группы. В клиническом исследовании, проведённом Е. Gökçe и S. Arslan [22], применение VR у пациентов, проходящих КГА, также оказалось более эффективным в снижении показателей боли и тревожности, а также в повышении уровня комфорта пациента, систолического артериального давления, частоты дыхания и пульса, по сравнению со стандартным лечением, проводимым в контрольной группе.

Технологию VR также использовали у пациентов, которым проводили сознательную седацию¹ во время процедуры TAVR. Пациентов опытной группы погружали на 30 мин в расслабляющую виртуальную среду, которую они предварительно выбрали. В общей сложности 81,3% пациентов использовали VR до процедуры и 37,5% — на протяжении всей процедуры. Результаты продемонстрировали значительное снижение тревожности, измеренное с помощью визуальной аналоговой шкалы (ВАШ), по сравнению с пациентами контрольной группы, которым проводили стандартную TAVR. Однако необходимо интерпретировать эти результаты с осторожностью из-за небольшого размера выборки (32 пациента) [23].

Имеются данные об использовании технологии VR перед процедурой катетерной абляции по поводу фибрилляции предсердий (ФП). По итогам исследований установлено, что данная процедура демонстрирует положительные результаты с точки зрения увеличения объёма знаний пациента, самоофективности, большей удовлетворённости и снижения опасений по поводу оперативного вмешательства [24–26]. Кроме того, применение VR перед абляцией эффективно снижает беспокойство и боль во время процедуры [26]. M.B. Brewer и соавт. [27] использовали VR у 40 пациентов, которым выполнена односторонняя радиочастотная абляция большой подкожной вены. Все процедуры завершены успешно, при этом не отмечено разницы в общем времени операции, и все пациенты в целом удовлетворены лечением. С помощью VR статистически значимо снижено беспокойство по поводу операции по сравнению с контрольной группой, получавшей стандартное лечение. Кроме того, во время процедуры у пациентов контрольной группы повышалась тревожность, в то время как у пациентов из группы VR она снижалась. Наконец, 85% пациентов из группы VR рекомендовали бы использование VR тем, кто проходит аналогичную процедуру.

РОЛЬ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ТЕРАПИИ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ

Помимо использования при интервенционных вмешательствах, VR может помочь в анатомическом планировании механической поддержки кровообращения. При лечении сердечной недостаточности (СН) более важным является понимание взаимодействия между анатомией, функционированием миокарда и клапанов, а также динамикой кровотока. Ярким примером является использование желудочковых вспомогательных устройств (Ventricular assist device, VAD) у людей с различными формами, размерами и функциональными особенностями желудочков сердца. Современные VAD возможно использовать у педиатрических

пациентов в качестве основы для назначения терапии. Использование имплантации с имитацией VR может помочь определить не только внешний вид, но и оптимальное позиционирование устройства для конкретного пациента с учётом анатомических особенностей [28]. В частности, использование виртуальных моделей позволяет в режиме реального времени протестировать имплантацию VAD и определить правильную ориентацию канюли. Правильное расположение канюли параллельно перегородке и на одной линии с атриовентрикулярным клапаном имеет решающее значение для достижения оптимальных результатов. Неправильное положение может привести к ухудшению кровотока и тромбозу. Предоперационная оценка может быть полезна для предотвращения осложнений, особенно у детей, у которых могут возникнуть осложнения, связанные с нарушением выброса крови из левого желудочка после вмешательства. Модели, разработанные специально для конкретного пациента, также могут предоставить ценную пространственную информацию о взаиморасположении VAD с основными структурами, такими как межжелудочковая перегородка, коронарные артерии, а также об ориентации сердечных клапанов и взаимодействии экстракардиальных устройств с грудной стенкой и диафрагмой.

A. Stepanenko и соавт. [29] описали свой опыт работы с использованием 3D-печати и виртуальной реальности у 53 взрослых пациентов с прогрессирующей СН. Их опыт показал, что использование 3D-моделирования повлияло на принятие оптимального клинического решения о типе используемой механической поддержки кровообращения. Аналогичным образом R.R. Davies и соавт. [30] и R.K. Ramaswamy и соавт. [31] описали использование VR для оценки внутривентрикулярного размещения интраперикардиальных устройств HeartWare VAD (HVAD; Medtronic, Дублин, Ирландия) и HeartMate 3 (Abbott, Чикаго, Иллинойс) у детей.

Кроме того, эти модели можно использовать для обучения хирургов, поскольку они позволяют пользователю физически манипулировать имплантатами и тестировать их, что повышает уверенность хирургов при проведении вмешательства. Таким образом, использование VR-реконструкции и специальных 3D-моделей может помочь точно спланировать оперативное вмешательство, выявить потенциальные риски и разработать план на случай возникновения экстренной ситуации для конкретного пациента.

РОЛЬ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ПРЕДПРОЦЕДУРНОМ ПЛАНИРОВАНИИ

Развитие цифровых технологий непрерывно преобразует знания и возможности в области оказания кардиологической помощи [32]. Использование искусственного

¹ Сознательная внутривенная седация — это метод, при котором пациент вводится в состояние лёгкого сна с помощью седативных препаратов.

интеллекта (ИИ) для автоматизации эхокардиографии и роботизированной хирургии при малоинвазивных операциях на митральном клапане стало реальностью, а не вымыслом. Сложность структурных сердечно-сосудистых вмешательств требует соответствующих технических навыков для их выполнения и готовности к любым непредвиденным осложнениям, которые могут быть опасны для жизни пациента. Развитие этой области связано с достижениями в области мультимодальной визуализации, позволяющей улучшить измерения, калибровку и предпроцедурное планирование. Технологии VR могут сыграть значимую роль в этой области, являясь важным инструментом как для пациента, так и для врача.

Интерактивные 3D-изображения и VR-симуляторы могут облегчить визуализацию сложной анатомии сердца для принятия решения об оптимальной стратегии вмешательства (чрескожного или хирургического).

VR в сочетании с другими методами визуализации, такими как эхокардиография и КТ сердца, позволяет тщательно спланировать оперативное вмешательство и оценить надлежащие зоны имплантации в случаях TAVR или mitra-clip, когда близлежащие структуры или выраженная кальцификация могут препятствовать использованию современных инструментов визуализации [15, 16]. Подобно авиасимуляторам, новая система VR может обеспечить безопасность для пациента, прогнозируя и предотвращая развитие фатальных осложнений, таких как смещение импланта, перфорации аорты, а также развитие острого коронарного синдрома [16].

ИНТРАПРОЦЕДУРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

VR применяется во многих сложных случаях, например, при митральных вмешательствах, когда анатомия митрального клапана динамична и сложна и в основном требует мультимодальной визуализации для достижения лучших результатов [26]. VR позволяет повысить точность и сократить время процедуры по сравнению с традиционным методом чреспищеводной эхографии (ЧПЭхоКГ). VR также может помочь лучше визуализировать параваскулярную регургитацию после TAVR и облегчить выбор оптимального VAR [33, 34].

В случае врождённых пороков сердца, таких как дефекты межпредсердной перегородки с аномальным дренажом лёгочных вен, использование VR помогало допускать меньшее количество ошибок при проведении трансептальной пункции в сочетании с компьютерной томографией и биплоскостной рентгеноскопией [33, 35, 36]. Кроме того, VR может способствовать всесторонней оценке состояния УЛП и прилегающих структур, таких как лёгочная артерия и огибающая артерия, при его окклюзии на фоне ФП и кровотечениях

высокого риска [33]. Создание голографической среды с использованием 3D-изображений, полученных на основе данных эхокардиографии или компьютерной томографии с возможностью интерактивного манипулирования устройством посредством жестов и голосовых команд, позволяет получить голографическую модель сердца. Это делает платформу удобной для работы кардиологической бригады [37].

РОЛЬ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ ВРОЖДЁННЫХ ПОРОКАХ СЕРДЦА

Планирование процедур при врождённых пороках сердца (ВПС) может быть сложной задачей из-за их широкого спектра и различных клинических проявлений. В кардиологии VR применяется для обучения и планирования процедур. Её использование началось ещё на доклинической стадии разработки имплантируемых устройств, а также при создании и тестировании прототипов перед проведением испытаний на животных и последующих строго регламентированных тестов по имплантации этих устройств человеку.

Поверхностные сетчатые модели, созданные на основе ручной сегментации изображений КТ, ангиографии или МРТ сердца, позволяют кардиохирургам легко планировать оперативное вмешательство, поскольку такие модели удобно обрезать или кадрировать [38]. Однако их создание может быть трудоёмким процессом. F. Raimondi и соавт. [39] описали использование новой технологии VR для обработки данных МРТ сердца без необходимости промежуточных этапов сегментации. Среднее время постобработки VR-моделей с использованием этого программного обеспечения составляло 5 мин.

При использовании VR с полным погружением точность диагностики пороков сердца значительно выше, чем при использовании 2D-дисплея и программного обеспечения VR — на 54,49 и 146,82% соответственно. Статистически значимых различий между диагностическими данными, предоставленными каждому участнику исследования, выявлено не было ($t=-1,01$, $p=0,31$) [40]. Другая группа исследователей сравнивала эффективность стереоскопической VR и моноскопического настольного компьютера. Обнаружено, что использование стереоскопической VR не привело к улучшению понимания анатомии ВПС ($p=0,11$). При этом группа, работавшая с моноскопическим настольным компьютером, отметила, что его интерфейс проще, чем у системы со стереоскопической VR ($p=0,01$) [41].

Недавние исследования, сравнивающие использование VR и 3D-печатных моделей сердца при ВПС, показали, что VR считают более полезной в медицинском образовании и предоперационном планировании, чем 3D-печатные модели сердца, однако статистически значимой разницы не выявлено [42]. Аналогичные результаты получены при оценке анатомических особенностей

во время сеанса VR при ВПС. В этом сеансе участвовали медицинские работники с различным образованием и опытом (кардиохирурги, кардиологи, кардиоанестезиологи, педиатры и патологоанатомы) и студенты-медики. При этом 72% участников оценили методы взаимодействия в VR (например, захват предметов, использование режущего инструмента) как «чрезвычайно интуитивные», а 94% выразили желание внедрить систему VR в своих учреждениях, оценив эту идею на 4 или 5 баллов по пятибалльной шкале [43].

Внедрение VR в медицинском учреждении требует значительных вложений на приобретение соответствующего оборудования, такого как гарнитуры VR, аппаратное и программное обеспечение, мониторы и прочее. Однако, если сравнивать с 3D-печатью, стоимость оборудования и материалов для 3D-печати, а также затраты на эксплуатацию устройств для 3D-печати остаются неизменными. VR даёт возможность редактировать и обновлять визуализированные 3D-модели и сетки по мере необходимости, сохранять их в цифровом формате и привязывать к медицинским картам пациентов для последующего использования [44].

VR является крайне полезным инструментом при планировании сложных интра- и экстракардиальных вмешательств. Так, исследовательская группа детских кардиохирургов сообщила о повышении своей уверенности при проведении и планировании хирургического вмешательства в 2/3 случаев и об изменении хирургической тактики в 60% случаев [38]. R.R. Davies и соавт. [30] описали использование VR для планирования установки взрослого VAR у ребёнка. (17 кг; 0,67 м²). Благодаря этому удалось сохранить функцию атриовентрикулярного клапана и уменьшить деформацию структур сердца. На данный момент использование VR ограничено несколькими центрами, однако частота её применения в академических и клинических учреждениях продолжает расти.

РАСШИРЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

ИИ является ключом к обработке сложных и многомерных данных в технологиях VR и AR, что облегчает внедрение новых технологий. Более конкретно ИИ вносит свой вклад в функционирование VR по 3 аспектам.

1. Сегментация: ИИ способствует точной и своевременной маркировке данных. Алгоритмы глубокого обучения позволяют отслеживать структуры, причём этот процесс может быть полностью автоматизирован или требовать подсказок и проверки со стороны человека. Время предварительной обработки сокращается от нескольких дней до нескольких минут, что делает этот этап необходимым для внедрения VR в клинические операции [38, 45].

2. Реконструкция: ИИ позволяет создавать реконструкции моделей человека в виртуальной реальности для определённых целей, например, для воссоздания коронарной артерии с автоматическим расчётом объёма атеросклеротической бляшки или для преобразования эхокардиограммы в VR-модель с трёхмерной анатомией и визуализацией кровотока для планирования хирургического вмешательства [38]. Этот шаг позволяет пользователю сосредоточиться на задачах в виртуальной среде, а не на настройке приложения [46]. D. Franson и соавт. [47] разработали систему для преобразования 2D-MPT-изображений в интерактивные 4D-структуры, доступные пользователю в режиме реального времени, со скоростью рендеринга, превышающей скорость сбора данных. Аналогично технология M. Bindschadler и соавт. [48] получила дальнейшее развитие, позволив манипулировать моделями сердца в дополненной реальности, которые можно просматривать на портативных устройствах с помощью простых жестов — функции, оптимизированной для консультирования пациентов.

3. Взаимодействие машины и человека: взаимодействие пользователя с VR может генерировать огромное количество многомерных данных, которые необходимо интегрировать с уменьшением размерности, усилением машинного обучения и взаимодействием VR с пользователем. Основное применение этой функции — медицинское образование [49, 50]. Такая технология также может уменьшить головокружение, связанное с использованием VR, что является частым ограничением для многих пользователей. Это достигается с помощью системы с шестью степенями свободы, которая улучшает глазодвигательные ощущения пользователя, тем самым уменьшая пространственную дезориентацию, которая приводит к появлению тошноты и головокружения [51].

Перечисленные аспекты позволили таким системам, как Immersive и Elucis (Realize Medical Inc, Канада), разработать платформу виртуальной реальности. Она может быть использована для одного исследования с визуализацией сердца, планирования процедур, удалённого взаимодействия между специалистами и консультирования пациентов. Также платформа позволяет сохранять модели для образовательных целей. Таким образом, обеспечивается высококачественная медицинская помощь.

ДАЛЬНЕЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Применение VR может существенно изменить современную кардиологическую практику. Интеграция данных КТ, МРТ и эхокардиографии всё ещё развивается, обещая слияние данных в реальном времени и создание трёхмерных анатомических структур с высоким разрешением [52, 53]. Современная кардиохирургия включает всё более сложные процедуры, требующие высокого уровня квалификации [53, 54]. VR может служить образовательным инструментом, позволяя приобретать необходимые

для клинической практики процедурные навыки. Она также преодолевает географические барьеры, обеспечивая лёгкий доступ к образовательным программам и конференциям и предлагая реальный опыт обучения. Кроме того, эти образовательные возможности могут распространяться на пациентов, улучшая их понимание анатомии и хода оперативного вмешательства. VR готова стать неотъемлемой частью стандартных планов лечения и находится на пороге интеграции в медицинские учреждения [53, 55].

Прежде чем начать широко применять VR в клинической практике, необходимо решить несколько проблем. Большинство существующих исследований ограничены по масштабам, охватывают небольшое количество случаев и проводятся в отдельных центрах. Чтобы тщательно изучить эффективность VR в клинической практике, нужны более масштабные исследования и рандомизированные контролируемые испытания. Также необходима стандартизация методологий, чтобы обеспечить согласованность и способствовать широкому внедрению. Интеграция мультимодальных изображений продвигается, но пока не реализована в полной мере. Использование различных платформ VR, каждая из которых требует специальных знаний, может создать дополнительную нагрузку для пользователей. Внедрение VR в клиническую практику может увеличить и без того значительную нагрузку на медицинский персонал. Несмотря на многообещающее будущее VR в медицине, крайне важно провести рандомизированные контролируемые исследования, которые продемонстрируют её полезность.

Несмотря на существующие трудности, ценность виртуальной реальности в клинической практике становится всё более очевидной. Чтобы в полной мере использовать возможности виртуальной реальности в здравоохранении, необходимо постоянно развивать технологии и стандартизировать их применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная кардиологическая помощь включает в себя всё более сложные процедуры, требующие высокого уровня квалификации. VR становится мощным инструментом как для предпроцедурного планирования, так и для образовательных мероприятий. VR открывает новые возможности для обучения и подготовки специалистов в области кардиологии. С её помощью можно создавать реалистичные симуляции различных ситуаций, с которыми врачи могут столкнуться в своей работе. Это позволяет обучающимся получить практический опыт без риска для реальных пациентов. Кроме того, VR может быть использована для предпроцедурного планирования сложных кардиологических операций. С её помощью можно детально изучить анатомию пациента, спланировать ход операции и предсказать возможные осложнения. Это может значительно повысить точность и безопасность

операций. Однако для полноценной интеграции VR в клиническую практику необходимо решить ряд проблем. Необходимо разработать стандарты безопасности и эффективности использования VR в медицинских целях. Также необходимо провести дополнительные исследования, чтобы оценить долгосрочные последствия использования VR для здоровья пациентов. В целом, интеграция VR в кардиологическую практику имеет большой потенциал. Она может значительно улучшить качество медицинской помощи, снизить риски и повысить эффективность обучения. Однако для реализации этого потенциала необходимо провести дополнительные исследования и разработать соответствующие стандарты.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении поисково-аналитической работы.

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 поисково-аналитической работы и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: С.С. Рашидова, Э.А. Бдоян — сбор и анализ литературных данных, научное редактирование рукописи; М.М. Тимурзиева, С.А. Лобановская — сбор и анализ литературных данных, написание рукописи; В.В. Науменко — анализ литературных данных, редактирование текста рукописи; А.В. Рахманова — анализ литературных данных, редактирование и утверждение текста; В.Д. Тимофеева — написание рукописи, сбор и анализ литературных данных; А.С. Гуцуляк — редактирование текста статьи, анализ литературных данных; А.А. Зайнуллин — сбор и анализ литературных данных, написание текста статьи; К.Р. Узбекова — утверждение финального варианта рукописи, редактирование текста статьи; В.А. Харитонов — анализ литературных данных, помощь в написании статьи; Н.Ф. Ахметова — анализ литературных данных, помощь в написании статьи, редактирование и утверждение финального варианта статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was not supported by any external sources of funding.

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. S.S. Rashidova, E.A. Bdoyan — collection and analysis of literary data, scientific editing of the manuscript; M.M. Timurzieva, S.A. Lobanovskaya — collection and analysis of literary data, writing of the manuscript; V.V. Naumenko — analysis of literary

data, editing of the text of the manuscript; A.V. Rakhmanova — data analysis, editing and approval of the text; V.D. Timofeeva — writing a manuscript, extraction and analysis of literary data; A.S. Gutsulyak — editing the text of the article, analyzing literary data; A.A. Zainullin — collecting literary data, writing the text of

the article; K.R. Uzbekova — approval of the final version of the manuscript, editing the text of the article; V.A. Kharitonova — analysis of literary data, assistance in writing the article; N.F. Akhmetova — analysis of literary data, assistance in writing the article, verification and approval of the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев В.А., Николаев А.А. Опыт и перспективы использования технологий виртуальной, дополненной и смешанной реальности в условиях цифровой трансформации системы здравоохранения // Медицинские технологии. Оценка и выбор. 2020. № 2. С. 35–42. EDN: AWZZTL doi: 10.17116/medtech20204002135
2. Jiang Z., Guo Y., Wang Z. Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT // J Ind Inf Integr. 2021. Vol. 22, N 11. P. 100196. doi: 10.1016/j.jii.2020.100196
3. Никитин А.И., Абрамов М.К. Применение VR в медицине. В кн.: Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики. 2019. Т. 2. С. 193–194. EDN: RLBTYQ
4. Haleem A., Javaid M. Industry 5.0 and its applications in orthopaedics // J Clin Orthop Trauma. 2019. Vol. 10, N 4. P. 807–808. doi: 10.1016/j.jcot.2018.12.010
5. Cho K.H., Hong M.R., Song W.K. Upper-Limb Robot-Assisted Therapy Based on Visual Error Augmentation in Virtual Reality for Motor Recovery and Kinematics after Chronic Hemiparetic Stroke: A Feasibility Study // Healthcare (Basel). 2022. Vol. 10, N 7. P. 1186. doi: 10.3390/healthcare10071186
6. Намиот Е.Д. Дополненная реальность в медицине // International Journal of Open Information Technologies. 2019. Т. 7, № 11. С. 94–99. EDN: ULRJXC
7. Sutherland J., Belec J., Sheikh A., et al. Applying Modern Virtual and Augmented Reality Technologies to Medical Images and Models // J Digit Imaging. 2019. Vol. 32, N 1. P. 38–53. doi: 10.1007/s10278-018-0122-7
8. Taghian A., Abo-Zahhad M., Sayed M.S., Abd El-Malek A.H. Virtual and augmented reality in biomedical engineering // Biomed Eng Online. 2023. Vol. 22, N 1. P. 76. doi: 10.1186/s12938-023-01138-3
9. Buytaert J.A., Dirckx J.J. Design and quantitative resolution measurements of an optical virtual sectioning three-dimensional imaging technique for biomedical specimens, featuring two-micrometer slicing resolution // J Biomed Opt. 2007. Vol. 12, N 1. P. 014039. doi: 10.1117/1.2671712
10. Silva J.N.A., Southworth M., Raptis C., Silva J. Emerging Applications of Virtual Reality in Cardiovascular Medicine // JACC Basic Transl Sci. 2018. Vol. 3, N 3. P. 420–430. doi: 10.1016/j.jacbs.2017.11.009
11. Rymuza B., Grodecki K., Kamiński J., et al. Holographic imaging during transcatheter aortic valve implantation procedure in bicuspid aortic valve stenosis // Kardiologia Pol. 2017. Vol. 75, N 10. P. 1056. doi: 10.5603/KP.2017.0195
12. Aslani N., Behmanesh A., Garavand A., et al. The Virtual Reality Technology Effects and Features in Cardiology Interventions Training: A Scoping Review // Med J Islam Repub Iran. 2022. Vol. 36. P. 77. doi: 10.47176/mjiri.36.77
13. Southworth M.K., Silva J.R., Silva J.N.A. Use of extended realities in cardiology // Trends Cardiovasc Med. 2020. Vol. 30, N 3. P. 143–148. doi: 10.1016/j.tcm.2019.04.005
14. Culbertson C., Nicolas S., Zaharovits I., et al. Methamphetamine craving induced in an online virtual reality environment // Pharmacol Biochem Behav. 2010. Vol. 96, N 4. P. 454–460. doi: 10.1016/j.pbb.2010.07.005
15. Arslan F., Gerckens U. Virtual support for remote proctoring in TAVR during COVID-19 // Catheter Cardiovasc Interv. 2021. Vol. 98, N 5. P. E733–E736. doi: 10.1002/ccd.29504
16. Liu J., Al'Aref S.J., Singh G., et al. An augmented reality system for image guidance of transcatheter procedures for structural heart disease // PLoS One. 2019. Vol. 14, N 7. P. e0219174. doi: 10.1371/journal.pone.0219174
17. de Jesus Catalã C.A., Pan R., Rossetto Kron-Rodrigues M., de Oliveira Freitas N. Virtual Reality Therapy to Control Burn Pain: Systematic Review of Randomized Controlled Trials // J Burn Care Res. 2022. Vol. 43, N 4. P. 880–888. doi: 10.1093/jbcr/irab213
18. Salisbury J.P. Using Medical Device Standards for Design and Risk Management of Immersive Virtual Reality for At-Home Therapy and Remote Patient Monitoring // JMIR Biomed Eng. 2021. Vol. 6, N 2. P. e26942. doi: 10.2196/26942
19. Keshvari M., Yeganeh M.R., Paryad E., et al. The effect of virtual reality distraction on reducing patients' anxiety before coronary angiography: a randomized clinical trial study // Egypt Heart J. 2021. Vol. 73, N 1. P. 98. doi: 10.1186/s43044-021-00224-y
20. Aardoom J.J., Hilt A.D., Woudenberg T., et al. A Preoperative Virtual Reality App for Patients Scheduled for Cardiac Catheterization: Pre-Post Questionnaire Study Examining Feasibility, Usability, and Acceptability // JMIR Cardio. 2022. Vol. 6, N 1. P. e29473. doi: 10.2196/29473
21. Morgan H., Nana M., Phillips D., Gallagher S. The Effect of a Virtual Reality Immersive Experience Upon Anxiety Levels, Procedural Understanding, and Satisfaction in Patients Undergoing Cardiac Catheterization: The Virtual Cath Trial // J Invasive Cardiol. 2021. Vol. 33, N 9. P. E681–E686. doi: 10.25270/jic/20.00664
22. Gökçe E., Arslan S. Effects of virtual reality and acupuncture interventions on pain, anxiety, vital signs and comfort in catheter extraction processes for patients undergoing coronary angiography: A randomized controlled trial // Int J Nurs Pract. 2023. Vol. 29, N 6. P. e13176. doi: 10.1111/ijn.13176
23. Bruno R.R., Lin Y., Wolff G., et al. Virtual reality-assisted conscious sedation during transcatheter aortic valve implantation: a randomised pilot study // EuroIntervention. 2020. Vol. 16, N 12. P. e1014–e1020. doi: 10.4244/EIJ-D-20-00269
24. Hermans A.N.L., Betz K., Verhaert D.V.M., et al. 360° Virtual reality to improve patient education and reduce anxiety towards atrial fibrillation ablation // Europace. 2023. Vol. 25, N 3. P. 855–862. doi: 10.1093/europace/euac246
25. Chang S.L., Kuo M.J., Lin Y.J., et al. Virtual reality informative aids increase residents' atrial fibrillation ablation procedures-related knowledge and patients' satisfaction // J Chin Med Assoc. 2021. Vol. 84, N 1. P. 25–32. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000464

26. Chang S.L., Kuo M.J., Lin Y.J., et al. Virtual reality-based preprocedural education increases preparedness and satisfaction of patients about the catheter ablation of atrial fibrillation // *J Chin Med Assoc.* 2021. Vol. 84, N 7. P. 690–697. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000555
27. Brewer M.B., Lau D.L., Chu E.A., et al. Virtual reality can reduce anxiety during office-based great saphenous vein radiofrequency ablation // *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord.* 2021. Vol. 9, N 5. P. 1222–1225. doi: 10.1016/j.jvsv.2020.12.081
28. Goo H.W., Park S.J., Yoo S.J. Advanced Medical Use of Three-Dimensional Imaging in Congenital Heart Disease: Augmented Reality, Mixed Reality, Virtual Reality, and Three-Dimensional Printing // *Korean J Radiol.* 2020. Vol. 21, N 2. P. 133–145. doi: 10.3348/kjr.2019.0625
29. Stepanenko A., Perez L.M., Ferre J.C., et al. 3D Virtual modelling, 3D printing and extended reality for planning of implant procedure of short-term and long-term mechanical circulatory support devices and heart transplantation // *Front Cardiovasc Med.* 2023. Vol. 10. P. 1191705. doi: 10.3389/fcvm.2023.1191705
30. Davies R.R., Hussain T., Tandon A. Using virtual reality simulated implantation for fit-testing pediatric patients for adult ventricular assist devices // *JTCVS Tech.* 2020. Vol. 6. P. 134–137. doi: 10.1016/j.jxjc.2020.10.017
31. Ramaswamy R.K., Marimuthu S.K., Ramarathnam K.K., et al. Virtual reality-guided left ventricular assist device implantation in pediatric patient: Valuable presurgical tool // *Ann Pediatr Cardiol.* 2021. Vol. 14, N 3. P. 388–392. doi: 10.4103/apc.apc_81_21
32. Tautz L., Walczak L., Georgii J., et al. Combining position-based dynamics and gradient vector flow for 4D mitral valve segmentation in TEE sequences // *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2020. Vol. 15, N 1. P. 119–128. doi: 10.1007/s11548-019-02071-4
33. Bruckheimer E., Rotschild C. Holography for imaging in structural heart disease // *EuroIntervention.* 2016. Vol. 12 Suppl X. P. 81–84. doi: 10.4244/EIJV12SXA15
34. Currie M.E., McLeod A.J., Moore J.T., et al. Augmented Reality System for Ultrasound Guidance of Transcatheter Aortic Valve Implantation // *Innovations (Phila).* 2016. Vol. 11, N 1. P. 31–39. doi: 10.1097/IMI.0000000000000235
35. Butera G., Sturla F., Pluchinotta F.R., et al. Holographic Augmented Reality and 3D Printing for Advanced Planning of Sinus Venosus ASD/Partial Anomalous Pulmonary Venous Return Percutaneous Management // *JACC Cardiovasc Interv.* 2019. Vol. 12, N 14. P. 1389–1391. doi: 10.1016/j.jcin.2019.03.020
36. Zbroński K., Rymuza B., Scisło P., et al. Augmented reality in left atrial appendage occlusion // *Kardiologia Pol.* 2018. Vol. 76, N 1. P. 212. doi: 10.5603/KP.2018.0017
37. Iannotta M., d'Aiello F.A., Van De Bruaene A., et al. Modern tools in congenital heart disease imaging and procedure planning: a European survey // *J Cardiovasc Med (Hagerstown).* 2024. Vol. 25, N 1. P. 76–87. doi: 10.2459/JCM.0000000000001569
38. Deng S., Wheeler G., Toussaint N., et al. A Virtual Reality System for Improved Image-Based Planning of Complex Cardiac Procedures // *J Imaging.* 2021. Vol. 7, N 8. P. 151. doi: 10.3390/jimaging7080151
39. Raimondi F., Vida V., Godard C., et al. Fast-track virtual reality for cardiac imaging in congenital heart disease // *J Card Surg.* 2021. Vol. 36, N 7. P. 2598–2602. doi: 10.1111/jocs.15508
40. Kim B., Loke Y.H., Mass P., et al. A Novel Virtual Reality Medical Image Display System for Group Discussions of Congenital Heart Disease: Development and Usability Testing // *JMIR Cardio.* 2020. Vol. 4, N 1. P. e20633. doi: 10.2196/20633
41. Patel N., Costa A., Sanders S.P., Ezon D. Stereoscopic virtual reality does not improve knowledge acquisition of congenital heart disease // *Int J Cardiovasc Imaging.* 2021. Vol. 37, N 7. P. 2283–2290. doi: 10.1007/s10554-021-02191-6
42. Lau I., Gupta A., Sun Z. Clinical Value of Virtual Reality versus 3D Printing in Congenital Heart Disease // *Biomolecules.* 2021. Vol. 11, N 6. P. 884. doi: 10.3390/biom11060884
43. Milano E.G., Pajaziti E., Schievano S., et al. P369 Patient specific virtual reality for education in congenital heart disease // *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2020. Vol. 21, Suppl. 1. doi: 10.1093/ehjci/jez319.218
44. Ong C.S., Krishnan A., Huang C.Y., et al. Role of virtual reality in congenital heart disease // *Congenit Heart Dis.* 2018. Vol. 13, N 3. P. 357–361. doi: 10.1111/chd.12587
45. Sadeghi A.H., Maat A.P.W.M., Taverne Y.J.H.J., et al. Virtual reality and artificial intelligence for 3-dimensional planning of lung segmentectomies // *JTCVS Tech.* 2021. Vol. 7. P. 309–321. doi: 10.1016/j.jxjc.2021.03.016
46. van de Woestijne P.C., Bakhuis W., Sadeghi A.H., et al. 3D Virtual Reality Imaging of Major Aortopulmonary Collateral Arteries: A Novel Diagnostic Modality // *World J Pediatr Congenit Heart Surg.* 2021. Vol. 12, N 6. P. 765–772. doi: 10.1177/21501351211045064
47. Franson D., Dupuis A., Gulani V., et al. A System for Real-Time, Online Mixed-Reality Visualization of Cardiac Magnetic Resonance Images // *J Imaging.* 2021. Vol. 7, N 12. P. 274. doi: 10.3390/jimaging7120274
48. Bindschadler M., Buddhe S., Ferguson M.R., et al. HEARTBEAT4D: An Open-source Toolbox for Turning 4D Cardiac CT into VR/AR // *J Digit Imaging.* 2022. Vol. 35, N 6. P. 1759–1767. doi: 10.1007/s10278-022-00659-y
49. Aeckersberg G., Gkremoutis A., Schmitz-Rixen T., Kaiser E. The relevance of low-fidelity virtual reality simulators compared with other learning methods in basic endovascular skills training // *J Vasc Surg.* 2019. Vol. 69, N 1. P. 227–235. doi: 10.1016/j.jvs.2018.10.047
50. Andersen N.L., Jensen R.O., Posth S., et al. Teaching ultrasound-guided peripheral venous catheter placement through immersive virtual reality: An explorative pilot study // *Medicine (Baltimore).* 2021. Vol. 100, N 27. P. e26394. doi: 10.1097/MD.00000000000026394
51. Arshad I., De Mello P., Ender M., et al. Reducing Cybersickness in 360-Degree Virtual Reality // *Multisens Res.* 2021. P. 1–17. doi: 10.1163/22134808-bja10066
52. Jung C., Wolff G., Wernly B., et al. Virtual and Augmented Reality in Cardiovascular Care: State-of-the-Art and Future Perspectives // *JACC Cardiovasc Imaging.* 2022. Vol. 15, N 3. P. 519–532. doi: 10.1016/j.jcmg.2021.08.017
53. Mahtab E.A.F., Egorova A.D. Current and future applications of virtual reality technology for cardiac interventions // *Nat Rev Cardiol.* 2022. Vol. 19, N 12. P. 779–780. doi: 10.1038/s41569-022-00789-4
54. Pezel T., Coisne A., Bonnet G., et al. Simulation-based training in cardiology: State-of-the-art review from the French Commission of Simulation Teaching (Commission d'enseignement par simulation-COMSI) of the French Society of Cardiology // *Arch Cardiovasc Dis.* 2021. Vol. 114, N 1. P. 73–84. doi: 10.1016/j.acvd.2020.10.004
55. Spiegel B., Fuller G., Lopez M., et al. Virtual reality for management of pain in hospitalized patients: A randomized comparative effectiveness trial // *PLoS One.* 2019. Vol. 14, N 8. P. e0219115. doi: 10.1371/journal.pone.0219115

REFERENCES

1. Nikolaev VA, Nikolaev AA. Virtual, augmented and mixed reality technologies in the context of digitalization of healthcare system. *Medical Technologies. Assessment and Choice*. 2020;(2):35–42. EDN: AWZZTL doi: 10.17116/medtech20204002135
2. Jiang Z, Guo Y, Wang Z. Digital twin to improve the virtual-real integration of industrial IoT. *J Ind Inf Integr*. 2021;22(11):100196. doi: 10.1016/j.jii.2020.100196
3. Nikitin AI, Abramov MK. The use of VR in medicine. In: Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики. *Sbornik materialov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Dnyu kosmonavтики*. 2019;2:193–194. (In Russ.) EDN: RLBTYQ
4. Haleem A, Javaid M. Industry 5.0 and its applications in orthopaedics. *J Clin Orthop Trauma*. 2019;10(4):807–808. doi: 10.1016/j.jcot.2018.12.010
5. Cho KH, Hong MR, Song WK. Upper-Limb Robot-Assisted Therapy Based on Visual Error Augmentation in Virtual Reality for Motor Recovery and Kinematics after Chronic Hemiparetic Stroke: A Feasibility Study. *Healthcare (Basel)*. 2022;10(7):1186. doi: 10.3390/healthcare10071186
6. Namiot ED. Augmented reality in medicine. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019;7(11):94–99. EDN: ULRJXC
7. Sutherland J, Belec J, Sheikh A, et al. Applying Modern Virtual and Augmented Reality Technologies to Medical Images and Models. *J Digit Imaging*. 2019;32(1):38–53. doi: 10.1007/s10278-018-0122-7
8. Taghian A, Abo-Zahhad M, Sayed MS, Abd El-Malek AH. Virtual and augmented reality in biomedical engineering. *Biomed Eng Online*. 2023;22(1):76. doi: 10.1186/s12938-023-01138-3
9. Buytaert JA, Dirckx JJ. Design and quantitative resolution measurements of an optical virtual sectioning three-dimensional imaging technique for biomedical specimens, featuring two-micrometer slicing resolution. *J Biomed Opt*. 2007;12(1):014039. doi: 10.1117/1.2671712
10. Silva JNA, Southworth M, Raptis C, Silva J. Emerging Applications of Virtual Reality in Cardiovascular Medicine. *JACC Basic Transl Sci*. 2018;3(3):420–430. doi: 10.1016/j.jacbs.2017.11.009
11. Rymuza B, Grodecki K, Kamiński J, et al. Holographic imaging during transcatheter aortic valve implantation procedure in bicuspid aortic valve stenosis. *Kardiol Pol*. 2017;75(10):1056. doi: 10.5603/KP.2017.0195
12. Aslani N, Behmanesh A, Garavand A, et al. The Virtual Reality Technology Effects and Features in Cardiology Interventions Training: A Scoping Review. *Med J Islam Repub Iran*. 2022;36:77. doi: 10.47176/mjiri.36.77
13. Southworth MK, Silva JR, Silva JNA. Use of extended realities in cardiology. *Trends Cardiovasc Med*. 2020;30(3):143–148. doi: 10.1016/j.tcm.2019.04.005
14. Culbertson C, Nicolas S, Zaharovits I, et al. Methamphetamine craving induced in an online virtual reality environment. *Pharmacol Biochem Behav*. 2010;96(4):454–460. doi: 10.1016/j.pbb.2010.07.005
15. Arslan F, Gerckens U. Virtual support for remote proctoring in TAVR during COVID-19. *Catheter Cardiovasc Interv*. 2021;98(5):E733–E736. doi: 10.1002/ccd.29504
16. Liu J, Al'Aref SJ, Singh G, et al. An augmented reality system for image guidance of transcatheter procedures for structural heart disease. *PLoS One*. 2019;14(7):e0219174. doi: 10.1371/journal.pone.0219174
17. de Jesus Catalã CA, Pan R, Rossetto Kron-Rodrigues M, de Oliveira Freitas N. Virtual Reality Therapy to Control Burn Pain: Systematic Review of Randomized Controlled Trials. *J Burn Care Res*. 2022;43(4):880–888. doi: 10.1093/jbcr/irab213
18. Salisbury JP. Using Medical Device Standards for Design and Risk Management of Immersive Virtual Reality for At-Home Therapy and Remote Patient Monitoring. *JMIR Biomed Eng*. 2021;6(2):e26942. doi: 10.2196/26942
19. Keshvari M, Yeganeh MR, Paryad E, et al. The effect of virtual reality distraction on reducing patients' anxiety before coronary angiography: a randomized clinical trial study. *Egypt Heart J*. 2021;73(1):98. doi: 10.1186/s43044-021-00224-y
20. Aardoom JJ, Hilt AD, Woudenberg T, et al. A Preoperative Virtual Reality App for Patients Scheduled for Cardiac Catheterization: Pre-Post Questionnaire Study Examining Feasibility, Usability, and Acceptability. *JMIR Cardio*. 2022;6(1):e29473. doi: 10.2196/29473
21. Morgan H, Nana M, Phillips D, Gallagher S. The Effect of a Virtual Reality Immersive Experience Upon Anxiety Levels, Procedural Understanding, and Satisfaction in Patients Undergoing Cardiac Catheterization: The Virtual Cath Trial. *J Invasive Cardiol*. 2021;33(9):E681–E686. doi: 10.25270/jic/20.00664
22. Gökçe E, Arslan S. Effects of virtual reality and acupuncture interventions on pain, anxiety, vital signs and comfort in catheter extraction processes for patients undergoing coronary angiography: A randomized controlled trial. *Int J Nurs Pract*. 2023;29(6):e13176. doi: 10.1111/ijn.13176
23. Bruno RR, Lin Y, Wolff G, et al. Virtual reality-assisted conscious sedation during transcatheter aortic valve implantation: a randomised pilot study. *EuroIntervention*. 2020;16(12):e1014–e1020. doi: 10.4244/EIJ-D-20-00269
24. Hermans ANL, Betz K, Verhaert DVM, et al. 360° Virtual reality to improve patient education and reduce anxiety towards atrial fibrillation ablation. *Europace*. 2023;25(3):855–862. doi: 10.1093/europace/euac246
25. Chang SL, Kuo MJ, Lin YJ, et al. Virtual reality informative aids increase residents' atrial fibrillation ablation procedures-related knowledge and patients' satisfaction. *J Chin Med Assoc*. 2021;84(1):25–32. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000464
26. Chang SL, Kuo MJ, Lin YJ, et al. Virtual reality-based preprocedural education increases preparedness and satisfaction of patients about the catheter ablation of atrial fibrillation. *J Chin Med Assoc*. 2021;84(7):690–697. doi: 10.1097/JCMA.0000000000000555
27. Brewer MB, Lau DL, Chu EA, et al. Virtual reality can reduce anxiety during office-based great saphenous vein radiofrequency ablation. *J Vasc Surg Venous Lymphat Disord*. 2021;9(5):1222–1225. doi: 10.1016/j.jvsv.2020.12.081
28. Goo HW, Park SJ, Yoo SJ. Advanced Medical Use of Three-Dimensional Imaging in Congenital Heart Disease: Augmented Reality, Mixed Reality, Virtual Reality, and Three-Dimensional Printing. *Korean J Radiol*. 2020;21(2):133–145. doi: 10.3348/kjr.2019.0625
29. Stepanenko A, Perez LM, Ferre JC, et al. 3D Virtual modelling, 3D printing and extended reality for planning of implant procedure of short-term and long-term mechanical circulatory support devices and heart transplantation. *Front Cardiovasc Med*. 2023;10:1191705. doi: 10.3389/fcvm.2023.1191705
30. Davies RR, Hussain T, Tandon A. Using virtual reality simulated implantation for fit-testing pediatric patients for adult ventricular assist devices. *JTCVS Tech*. 2020;6:134–137. doi: 10.1016/j.xjtc.2020.10.017
31. Ramaswamy RK, Marimuthu SK, Ramarathnam KK, et al. Virtual reality-guided left ventricular assist device implantation in pediatric patient: Valuable presurgical tool. *Ann Pediatr Cardiol*. 2021;14(3):388–392. doi: 10.4103/apc.apc_81_21

32. Tautz L, Walczak L, Georgii J, et al. Combining position-based dynamics and gradient vector flow for 4D mitral valve segmentation in TEE sequences. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2020;15(1):119–128. doi: 10.1007/s11548-019-02071-4
33. Bruckheimer E, Rotschild C. Holography for imaging in structural heart disease. *EuroIntervention.* 2016;12 Suppl X:81–84. doi: 10.4244/EIJV12SXA15
34. Currie ME, McLeod AJ, Moore JT, et al. Augmented Reality System for Ultrasound Guidance of Transcatheter Aortic Valve Implantation. *Innovations (Phila).* 2016;11(1):31–39. doi: 10.1097/IMI.0000000000000235
35. Butera G, Sturla F, Pluchinotta FR, et al. Holographic Augmented Reality and 3D Printing for Advanced Planning of Sinus Venosus ASD/Partial Anomalous Pulmonary Venous Return Percutaneous Management. *JACC Cardiovasc Interv.* 2019;12(14):1389–1391. doi: 10.1016/j.jcin.2019.03.020
36. Zbroński K, Rymuza B, Scisto P, et al. Augmented reality in left atrial appendage occlusion. *Kardiol Pol.* 2018;76(1):212. doi: 10.5603/KP.2018.0017
37. Iannotta M, d'Aiello FA, Van De Bruaene A, et al. Modern tools in congenital heart disease imaging and procedure planning: a European survey. *J Cardiovasc Med (Hagerstown).* 2024;25(1):76–87. doi: 10.2459/JCM.0000000000001569
38. Deng S, Wheeler G, Toussaint N, et al. A Virtual Reality System for Improved Image-Based Planning of Complex Cardiac Procedures. *J Imaging.* 2021;7(8):151. doi: 10.3390/jimaging7080151
39. Raimondi F, Vida V, Godard C, et al. Fast-track virtual reality for cardiac imaging in congenital heart disease. *J Card Surg.* 2021;36(7):2598–2602. doi: 10.1111/jocs.15508
40. Kim B, Loke YH, Mass P, et al. A Novel Virtual Reality Medical Image Display System for Group Discussions of Congenital Heart Disease: Development and Usability Testing. *JMIR Cardio.* 2020;4(1):e20633. doi: 10.2196/20633
41. Patel N, Costa A, Sanders SP, Ezon D. Stereoscopic virtual reality does not improve knowledge acquisition of congenital heart disease. *Int J Cardiovasc Imaging.* 2021;37(7):2283–2290. doi: 10.1007/s10554-021-02191-6
42. Lau I, Gupta A, Sun Z. Clinical Value of Virtual Reality versus 3D Printing in Congenital Heart Disease. *Biomolecules.* 2021;11(6):884. doi: 10.3390/biom11060884
43. Milano EG, Pajaziti E, Schievano S, et al. P369 Patient specific virtual reality for education in congenital heart disease. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2020;21(suppl 1). doi: 10.1093/ehjci/jez319.218
44. Ong CS, Krishnan A, Huang CY, et al. Role of virtual reality in congenital heart disease. *Congenit Heart Dis.* 2018;13(3):357–361. doi: 10.1111/chd.12587
45. Sadeghi AH, Maat APWM, Taverne YJHJ, et al. Virtual reality and artificial intelligence for 3-dimensional planning of lung segmentectomies. *JTCVS Tech.* 2021;7:309–321. doi: 10.1016/j.xjtc.2021.03.016
46. van de Woestijne PC, Bakhuis W, Sadeghi AH, et al. 3D Virtual Reality Imaging of Major Aortopulmonary Collateral Arteries: A Novel Diagnostic Modality. *World J Pediatr Congenit Heart Surg.* 2021;12(6):765–772. doi: 10.1177/21501351211045064
47. Franson D, Dupuis A, Gulani V, et al. A System for Real-Time, Online Mixed-Reality Visualization of Cardiac Magnetic Resonance Images. *J Imaging.* 2021;7(12):274. doi: 10.3390/jimaging7120274
48. Bindschadler M, Buddhe S, Ferguson MR, et al. HEARTBEAT4D: An Open-source Toolbox for Turning 4D Cardiac CT into VR/AR. *J Digit Imaging.* 2022;35(6):1759–1767. doi: 10.1007/s10278-022-00659-y
49. Aeckersberg G, Gkremoutis A, Schmitz-Rixen T, Kaiser E. The relevance of low-fidelity virtual reality simulators compared with other learning methods in basic endovascular skills training. *J Vasc Surg.* 2019;69(1):227–235. doi: 10.1016/j.jvs.2018.10.047
50. Andersen NL, Jensen RO, Posth S, et al. Teaching ultrasound-guided peripheral venous catheter placement through immersive virtual reality: An explorative pilot study. *Medicine (Baltimore).* 2021;100(27):e26394. doi: 10.1097/MD.00000000000026394
51. Arshad I, De Mello P, Ender M, et al. Reducing Cybersickness in 360-Degree Virtual Reality. *Multisens Res.* 2021:1–17. doi: 10.1163/22134808-bja10066
52. Jung C, Wolff G, Wernly B, et al. Virtual and Augmented Reality in Cardiovascular Care: State-of-the-Art and Future Perspectives. *JACC Cardiovasc Imaging.* 2022;15(3):519–532. doi: 10.1016/j.jcmg.2021.08.017
53. Mahtab EAF, Egorova AD. Current and future applications of virtual reality technology for cardiac interventions. *Nat Rev Cardiol.* 2022;19(12):779–780. doi: 10.1038/s41569-022-00789-4
54. Pezel T, Coisne A, Bonnet G, et al. Simulation-based training in cardiology: State-of-the-art review from the French Commission of Simulation Teaching (Commission d'enseignement par simulation-COMSI) of the French Society of Cardiology. *Arch Cardiovasc Dis.* 2021;114(1):73–84. doi: 10.1016/j.acvd.2020.10.004
55. Spiegel B, Fuller G, Lopez M, et al. Virtual reality for management of pain in hospitalized patients: A randomized comparative effectiveness trial. *PLoS One.* 2019;14(8):e0219115. doi: 10.1371/journal.pone.0219115

ОБ АВТОРАХ

*** Рашидова Седя Сулеймановна;**

адрес: Россия, 368000, Хасавюрт, ул. Алиева, д. 21

ORCID: 0009-0002-9090-0688;

eLibrary SPIN: 5824-7314;

e-mail: rrstr1990@mail.ru

Бдоян Эмма Альбертовна;

ORCID: 0009-0002-4343-1049;

e-mail: emma.bdoyan@mail.ru

Тимурзиева Мадина Мухарбековна;

ORCID: 0009-0002-6048-7108;

e-mail: timurziyeva.madina@bk.ru

AUTHORS' INFO

*** Seda S. Rashidova, MD;**

address: 21 Aliev str., 368000, Khasavyurt, Russia;

ORCID: 0009-0002-9090-0688;

eLibrary SPIN: 5824-7314;

e-mail: rrstr1990@mail.ru

Emma A. Bdoyan;

ORCID: 0009-0002-4343-1049;

e-mail: emma.bdoyan@mail.ru

Madina M. Timurziyeva;

ORCID: 0009-0002-6048-7108;

e-mail: timurziyeva.madina@bk.ru

Лобановская Софья Александровна;

ORCID: 0009-0009-7486-0672;

e-mail: sonyalobanovsk11@yandex.ru

Науменко Валерия Викторовна;

ORCID: 0009-0000-3836-9231;

e-mail: valerianaumenko555@gmail.com

Рахманова Ангелина Вадимовна;

ORCID: 0009-0002-2209-8988;

e-mail: alyarakhmanova@mail.ru

Тимофеева Валерия Дмитриевна;

ORCID: 0009-0000-0040-6447;

e-mail: timofeeva-valera@mail.ru

Гуцуляк Алексей Сергеевич;

ORCID: 0009-0002-3242-9859;

e-mail: alex.guculyak@gmail.com

Зайнуллин Артем Артурович;

ORCID: 0000-0003-1581-7120;

e-mail: artem.z011@mail.ru

Узбекова Карина Рустамовна;

ORCID: 0009-0009-7099-2635;

eLibrary SPIN: 7263-6262;

e-mail: uzkarina@mail.ru

Харитонов Валерия Артуровна;

ORCID: 0009-0009-0978-2997;

e-mail: valeriya0901@bk.ru

Ахметова Нарина Фаритовна;

ORCID: 0000-0003-0073-4672;

eLibrary SPIN: 7830-7828;

e-mail: junehiltoncamp@gmail.com

Sofya A. Lobanovskaya;

ORCID: 0009-0009-7486-0672;

e-mail: sonyalobanovsk11@yandex.ru

Valeria V. Naumenko;

ORCID: 0009-0000-3836-9231;

e-mail: valerianaumenko555@gmail.com

Angelina V. Rakhmanova;

ORCID: 0009-0002-2209-8988;

e-mail: alyarakhmanova@mail.ru

Valeriya D. Timofeeva;

ORCID: 0009-0000-0040-6447;

e-mail: timofeeva-valera@mail.ru

Alexey S. Gutsulyak, MD;

ORCID: 0009-0002-3242-9859;

e-mail: alex.guculyak@gmail.com

Artem A. Zainullin;

ORCID: 0000-0003-1581-7120;

e-mail: artem.z011@mail.ru

Karina R. Uzbekova;

ORCID: 0009-0009-7099-2635;

eLibrary SPIN: 7263-6262;

e-mail: uzkarina@mail.ru

Valeriya A. Kharitonova;

ORCID: 0009-0009-0978-2997;

e-mail: valeriya0901@bk.ru

Narina F. Akhmetova;

ORCID: 0000-0003-0073-4672;

eLibrary SPIN: 7830-7828;

e-mail: junehiltoncamp@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author