

УДК 616.36/37-089-072.1:004

DOI: 10.34215/1609-1175-2026-1-5-13



Роль и клиническое значение технологий дополненной реальности в абдоминальной хирургии: обзор литературы

И.А. Шаманов

Северо-Кавказская государственная академия, Черкесск, Россия

Технологии дополненной реальности представляют собой перспективное направление в современной абдоминальной хирургии, обеспечивая наложение виртуальных трехмерных моделей анатомических структур на реальное операционное поле. Проведенный обзор литературы последних пяти лет показал наиболее значительные достижения в применении дополненной реальности при операциях на печени и поджелудочной железе, где данная технология способствует снижению интраоперационной кровопотери, сокращению частоты гемотрансфузий и продолжительности госпитализации. Клинические исследования подтверждают безопасность метода и его потенциал в повышении радикальности онкологических резекций. Несмотря на имеющиеся технические ограничения и необходимость стандартизации, дополненная реальность демонстрирует значительный потенциал для улучшения интраоперационной навигации, снижения когнитивной нагрузки хирурга и повышения точности выполнения сложных оперативных вмешательств. Дальнейшее развитие технологии связано с интеграцией искусственного интеллекта и роботических систем.

Ключевые слова: дополненная реальность, абдоминальная хирургия, навигация, лапароскопия, резекция печени, хирургия поджелудочной железы

Поступила в редакцию: 19.11.2025. Получена после доработки: 14.12.2025. Принята к публикации: 12.01.2026

Для цитирования: Шаманов И.А. Роль и клиническое значение технологий дополненной реальности в абдоминальной хирургии: обзор литературы. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2026;1:5–13. doi: 10.34215/1609-1175-2026-1-5-13

Для корреспонденции: Шаманов Ибрагим Аубекирович – к.м.н., доцент кафедры хирургических болезней Северо-Кавказской государственной академии (369001, Черкесск, ул. Ставропольская, 36); ORCID: 0009-0006-7276-4415; e-mail: legolaspaphos@gmail.com

Augmented reality technologies in abdominal surgery, their clinical significance and current role: A literature review

I.A. Shamanov

North Caucasian State Academy, Cherkessk, Russia

Augmented reality (AR) technologies present a promising approach to modern abdominal surgery as they provide virtual, 3D models of anatomical structures overlaid on the actual surgical field. A literature review of the past five years revealed significant advances in using AR in liver and pancreatic surgeries due to its effectiveness in reducing intraoperative blood loss, blood transfusion frequency, and hospital stay length. Clinical studies confirm not only the safety of the method, but also its potential to increase the extent of oncological resections. Technical limitations and the need for standardization notwithstanding, augmented reality shows great promise in improving intraoperative navigation, reducing cognitive load on surgeons, and enhancing the precision of complex surgical procedures. The further development of AR technology involves integration with artificial intelligence and robotic systems.

Keywords: augmented reality, abdominal surgery, navigation, laparoscopy, liver resection, pancreatic surgery

Received 19 November 2025; Revised 14, December 2025; Accepted 12 January 2026

For citation: Shamanov I.A. Augmented reality technologies in abdominal surgery, their clinical significance and current role: A literature review. *Pacific Medical Journal*. 2026;1:5–13. doi: 10.34215/1609-1175-2026-1-5-13

Corresponding author: Ibragim A. Shamanov, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, Department of Surgical Diseases, North Caucasian Academy (36 Stavropolskaya str., Cherkessk, 369001, Russia); ORCID: 0009-0006-7276-4415; e-mail: legolaspaphos@gmail.com

Дополненная реальность (AR, augmented reality) – это технология, позволяющая накладывать виртуальные объекты, например, трехмерные модели анатомических структур, метки или подсказки, на изображение реального мира в режиме реального времени [1]. В хирургии AR создает эффект «прозрачной анатомии», при котором скрытые структуры (сосуды, опухоли и пр.) визуализируются непосредственно поверх реального операционного поля [2, 3].

Особое значение такие технологии имеют в абдоминальной хирургии, где сложная анатомия, например разветвленная сосудистая сеть печени, желчные протоки, глубоко расположенные опухоли, затрудняет ориентацию хирурга. Традиционно хирурги планируют операцию по данным предоперационных компьютерной (КТ) и магнитно-резонансной томографий (МРТ) и интраоперационно полагаются на собственный опыт и ограниченные анатомические ориентиры [4, 5].

AR-технологии же могут предоставить хирургу «рентгеновское зрение», совместив предоперационную 3D-модель на основе КТ/МРТ с реальным изображением – например с эндоскопической картинкой или с полем зрения через AR-очки. Такой подход теоретически повышает точность манипуляций и безопасность операций [1, 3].

Актуальность применения AR-технологий в абдоминальной хирургии определяется необходимостью повышения эффективности и безопасности хирургических вмешательств. Несмотря на значительный прогресс в развитии минимально инвазивной хирургии, сохраняется ряд существенных проблем. К числу наиболее значимых относятся сложность интраоперационной визуализации точных границ резекции печени, затруднения в определении топографо-анатомических взаимоотношений опухоли с магистральными сосудами, высокий риск ятрогенного повреждения критических анатомических структур – желчных протоков, магистральных сосудов и прилежащих органов [6]. При лапароскопических вмешательствах отсутствие непосредственной тактильной обратной связи существенно затрудняет локализацию опухолевых образований, не доступных визуальной оценке. Ограниченное операционное поле и двухмерная визуализация при лапароскопии обуславливают повышенный риск интраоперационных осложнений [7, 8].

Интраоперационная AR-навигация способна решить часть этих проблем, обеспечив хирурга дополнительной информацией непосредственно в поле зрения, а не на отдельном экране. Благодаря этому снижается когнитивная нагрузка и улучшается пространственное восприятие [9]. Ожидается, что использование AR может привести к сокращению времени операции и кровопотери, повышению радикальности опухолевых резекций и снижению осложнений [3, 10].

Цель обзора: проанализировать современную литературу по применению технологий дополненной реальности в абдоминальной хирургии и оценить их роль и клиническое значение, прежде всего влияние на исходы лечения пациентов.

Материалы и методы

Проведен нарративный обзор литературы последних 5 лет с приоритетом клинических исследований и обзоров в PubMed, Google Scholar, eLibrary. Источники включали англоязычные и русскоязычные статьи, содержащие ключевые слова на английском и русском языках: «augmented reality surgery», «augmented reality abdominal surgery», «augmented reality liver resection», «дополненная реальность хирургия», «дополненная реальность абдоминальная хирургия», «дополненная реальность хирургия печени» и др. Из анализа исключались заведомо нерелевантные области (за пределами абдоминальной хирургии) и работы только на животных или фантоме. Основное внимание уделено вмешательствам на печени, поджелудочной железе, желчном

пузыре и желчных протоках, желудке и кишечнике с использованием AR-ассистированных навигационных систем, гарнитур (например, HoloLens или Apple Vision Pro) или экранных решений. Особое внимание уделялось сообщенным результатам операций (объем интраоперационной кровопотери, длительность операции, осложнения, сроки госпитализации) при использовании AR и перспективным технологиям (дополненная/смешанная реальность, носимые устройства). Количественный метаанализ данных не проводился ввиду гетерогенности исследований (разные типы операций, различные показатели исходов).

Результаты и обсуждение

AR в хирургии печени. Наибольший массив данных по применению AR-технологий в хирургии накоплен в области гепатопанкреатобилиарных вмешательств, преимущественно при резекциях печени [5–7, 11–17]. Влияние AR-технологий изучено главным образом на модели лапароскопической резекции печени у онкологических больных.

В проспективном исследовании Zhang и соавт. [7] проанализированы результаты 85 трехмерных лапароскопических анатомических гепатэктомий, выполненных с применением AR-навигации ($n = 44$) и без нее ($n = 41$). Использование навигационной системы на основе AR ассоциировалось со статистически значимым снижением интраоперационной кровопотери (медиана 200 против 300 мл, $p = 0,002$), частоты гемотрансфузий (10 против 42%, $p < 0,001$) и длительности послеоперационного койко-дня (медиана 8 против 10 суток, $p = 0,003$) при сопоставимой частоте послеоперационных осложнений. По мнению авторов, AR-навигация облегчала идентификацию сосудистых и билиарных структур, что способствовало улучшению периоперационных исходов [7].

В работе Тао и соавт. [16] представлены результаты 31 лапароскопической резекции восьмого сегмента печени, 16 из которых выполнены с применением AR-навигации в сочетании с флуоресцентной визуализацией. Данная технология обеспечила статистически значимое снижение интраоперационной кровопотери (медиана 125 против 300 мл, $p = 0,003$) при сопоставимых ранних послеоперационных показателях. Анализ точности резекции продемонстрировал, что в группе с AR-навигацией фактически удаленный объем печеночной ткани более точно соответствовал планируемому объему [16]. Полученные данные свидетельствуют о безопасности AR-навигации при лапароскопической гепатэктомии и ее потенциале в снижении травматичности вмешательства и оптимизации этапа планирования резекции.

AR в хирургии поджелудочной железы. Поджелудочная железа благодаря ретроперитонеальной фиксации и ограниченной подвижности представляет собой оптимальный анатомический объект для применения AR-технологий. В ретроспективном исследовании Wu и соавт. [18] 82 пациента, перенесших лапароскопическую

панкреатодуоденэктомию, были распределены на две группы: с использованием AR-навигации ($n = 41$) и без нее ($n = 41$). В группе AR отмечалась статистически значимо меньшая интраоперационная кровопотеря (219,5 против 312,2 мл, $p = 0,023$) и существенное снижение частоты послеоперационных осложнений [18]. Например, свищ поджелудочной железы развился у 12,2% пациентов против 46,3% в контрольной группе ($p = 0,002$), несостоятельность билиодигестивного анастомоза не отмечено ни в одном случае применения AR в отличие от контрольной группы, где частота данного осложнения достигала 14,6% ($p = 0,026$) [18]. Продолжительность госпитализации была короче в группе AR (11,3 против 20,0 дня, $p < 0,001$), тогда как длительность операции оказалась больше (420 против 349 минут, $p < 0,001$), что обусловлено временными затратами на калибровку системы [18]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что AR-навигация при лапароскопических вмешательствах на поджелудочной железе способствует улучшению идентификации сосудистых структур и границ резекции, что приводит к снижению объема оперативного вмешательства и частоты осложнений.

Носимые AR-системы также находят применение в хирургии поджелудочной железы. В проспективном пилотном исследовании Javaheri и соавт. [19] была описана первая коммерческая AR-гарнитура (Microsoft HoloLens 2) со специализированным программным обеспечением для визуализации трехмерных моделей сосудов и опухоли в режиме реального времени. У 5 пациентов, оперированных на поджелудочной железе с применением данной системы, хирурги точно идентифицировали анатомические структуры без ошибок. Также авторами была отмечена высокая пригодность AR-технологии для предоперационного планирования при отсутствии осложнений, связанных с использованием оборудования [19]. Исследование подтверждает техническую осуществимость AR-ассистенции в хирургии поджелудочной железы и демонстрирует улучшение интраоперационной навигации хирурга при сложных анатомических соотношениях.

Клинический случай, представленный Templin и соавт. [20], наглядно показал дополнительные возможности AR-технологий. У пациента с аденокарциномой головки поджелудочной железы была выполнена цифровая интерактивная трехмерная реконструкция сосудистой анатомии с применением AR для планирования резекции. Это позволило выявить редкую анатомическую вариацию – персистирующий эмбриональный анастомоз Бюлера между верхней брыжеечной артерией и чревным стволом, который не визуализировался при стандартной компьютерной томографии и КТ-ангиографии, но был подтвержден интраоперационно [20]. На основании полученных данных план операции был скорректирован, что позволило снизить риск ишемии мезентериальной области и обеспечить выполнение резекции R0. Осложнений, связанных с применением AR-навигации, не отмечено [20].

Кроме того, современные систематические обзоры демонстрируют значительный прогресс в применении технологий дополненной реальности при хирургических вмешательствах на поджелудочной железе, особенно в контексте предоперационного трехмерного планирования и интраоперационной навигации. Так, интеграция AR-систем обеспечила более точную визуализацию сосудистых структур и границ резекции, что имеет критическое значение при выполнении технически сложных панкреатических операций [21, 22]. Помимо клинического применения исследователи отмечают существенный потенциал технологии дополненной реальности в области хирургического образования и стандартизации сложных этапов оперативных вмешательств. Накопленные данные свидетельствуют о том, что использование AR-технологий способствует повышению точности и безопасности хирургических процедур, однако их широкое клиническое внедрение требует дополнительной валидации и технологической оптимизации [23, 24].

AR в хирургии желчевыводящих путей. Технология дополненной реальности обеспечивает прецизионную визуализацию анатомии желчевыводящих путей, что приобретает особое значение при выполнении реконструктивных вмешательств. Святненко и соавт. [25] представили опыт применения AR-навигации при реконструктивной операции на билиарном тракте по поводу стриктуры общего печеночного протока с восстановлением проходимости билиодигестивного анастомоза. На предоперационном этапе была создана трехмерная топографо-анатомическая модель портального сегмента печени с использованием AR-технологии, которая в ходе оперативного вмешательства проецировалась на операционное поле посредством голографического наложения [25]. Авторы констатируют значительное сокращение времени идентификации и дифференциации васкулярно-билиарных структур в области ворот печени, несмотря на выраженный спаечный процесс, что было достигнуто благодаря применению AR-технологии. Послеоперационный период протекал без осложнений, с адекватным восстановлением анатомических взаимоотношений [25]. Авторы заключили, что применение дополненной реальности демонстрирует высокий потенциал при хирургических вмешательствах на гепатопанкреатодуоденальной зоне, особенно при повторных операциях, способствуя сокращению длительности вмешательства и снижению частоты осложнений [25].

В проспективной серии наблюдений Kitagawa и соавт. [26], включавшей 27 пациентов, 9 больных были оперированы с использованием 3D-голографической навигации посредством носимого AR-устройства, тогда как 18 пациентов составили контрольную группу с традиционной 2D-визуализацией [26]. Исследование подтвердило безопасность метода: не было зарегистрировано интраоперационных кровотечений или осложнений. Медиана продолжительности операции в группе с 3D-навигацией составила 74 минуты по сравнению

с 58 минутами в контрольной группе с 2D-поддержкой, что указывает на потенциальное увеличение операционного времени при внедрении новой технологии [26]. Примечательно, что восприятие технологии различалось в зависимости от опыта хирурга. Молодой хирург оценил все 9 вмешательств с использованием 3D-навигации как «обычные» или «легкие» по сравнению с операциями в 2D-группе. В то же время опытный хирург в трех случаях (33%) счел работу с 3D-моделями «более сложной» [26]. Авторы пришли к заключению, что применение AR-технологий в лапароскопической холецистэктомии технически осуществимо, однако эффективность метода может зависеть от уровня подготовки хирурга, что требует дальнейшего изучения [26].

На сегодня данные по применению дополненной реальности при традиционной холецистэктомии остаются ограниченными, хотя первые клинические исследования уже проводятся [26–28].

AR в желудочно-кишечной хирургии. Применение технологий дополненной реальности при хирургических вмешательствах на желудке и кишечнике в настоящее время находится на стадии экспериментальных и пилотных исследований [29, 30]. Внедрение AR в эндоскопическую хирургию, в частности при эндоскопических резекциях опухолей желудочно-кишечного тракта, остается ограниченным вследствие высокой подвижности органов и недостатка стабильных анатомических ориентиров [4, 31]. Вместе с тем перспективным представляется использование AR для предоперационного планирования гастрэктомий путем наложения трехмерных моделей опухоли на данные компьютерной томографии, а также для подготовки хирургов [22].

Значительный интерес представляет опыт применения AR-гарнитур в общей лапароскопической хирургии. Broderick и соавт. [32] выполнили серию из 41 операции, преимущественно бариатрических, с использованием устройства Apple Vision Pro, позволяющего хирургу визуализировать виртуальные мониторы с изображением лапароскопической камеры. Применение AR обеспечило улучшенную визуализацию анатомических ориентиров и упростило интраоперационное принятие решений, что способствовало повышению точности манипуляций [32]. Авторы отметили снижение когнитивной нагрузки на хирургов и уменьшение количества навигационных ошибок по сравнению со стандартными методами визуализации. Вмешательства с использованием AR выполнялись без увеличения частоты осложнений или необходимости конверсии в открытую операцию. Исследователи заключили, что технология продемонстрировала высокую выполнимость и значительный потенциал для дальнейшего клинического внедрения [32].

Ryu и соавт. [33] исследовали применение голографической навигации на основе технологии смешанной реальности при лапароскопических операциях по поводу колоректального рака. AR-система позволяла

проецировать предоперационную трехмерную модель на операционное поле в режиме реального времени. Хирурги отметили улучшение пространственного восприятия сосудисто-анатомических структур и более точную оценку границ резекции. Технология сократила время идентификации ключевых анатомических ориентиров и повысила уверенность хирургов при выполнении диссекции. Авторы подчеркнули высокую воспроизводимость методики и ее пригодность для дальнейших клинических исследований [33].

Bracale и соавт. [34] представили опыт применения AR-очков при хирургическом лечении колоректального рака. Использование AR позволило хирургу визуализировать трехмерную анатомическую модель таза, совмещенную с операционным полем в реальном времени. Это улучшило пространственную ориентацию в узком тазовом пространстве и облегчило выделение критически важных структур. Хирурги отметили сокращение вынужденных пауз в ходе операции и более плавное выполнение диссекции. Авторы пришли к выводу, что технологии дополненной и виртуальной реальности могут повысить точность и безопасность резекции опухоли, особенно в анатомически сложных условиях [34].

Таким образом, применение AR-технологий в этой области хирургии демонстрирует обнадеживающие результаты в части улучшения пространственной визуализации, снижения когнитивной нагрузки хирургов и повышения точности выполнения оперативных вмешательств.

AR в эндоскопии и мультидисциплинарных системах. Отдельного внимания заслуживает применение AR-технологий при эндоскопических манипуляциях. Применение AR-технологий в эндоскопии демонстрирует значительный потенциал для повышения точности и эффективности вмешательств. Согласно данным Metzger и соавт. [31], AR-навигация обеспечивает улучшенную визуализацию анатомических ориентиров и способствует более уверенной навигации хирурга в условиях ограниченного обзора операционного поля. Авторы отмечают, что технология позволяет сократить время выполнения отдельных манипуляций и снизить частоту технических ошибок, что особенно актуально при проведении эндоскопической резекции слизистой и подслизистой оболочек [31].

Вместе с тем эндоскопические вмешательства предъявляют к AR-системам повышенные требования. Изменчивость формы мягких тканей, отсутствие стабильных анатомических ориентиров и оптические артефакты (задымление, кровотечение, складчатость стенки кишки) существенно затрудняют точное совмещение виртуальной модели с реальным эндоскопическим изображением [10, 35].

Тем не менее исследователи подчеркивают, что интеграция AR-систем с алгоритмами искусственного интеллекта для распознавания анатомических структур и прогнозирования тканевых деформаций может значительно расширить функциональные возможности технологии и повысить ее клиническую значимость [31].

Технологические решения. Развитие дополненной реальности в хирургии характеризуется использованием нескольких принципиально различных технологических платформ, каждая из которых обладает специфическими возможностями и ограничениями. Выбор конкретной AR-системы определяется типом хирургического доступа, требуемой точностью навигации и доступностью технического оснащения [29, 36, 37].

В анализируемых исследованиях применялись разные варианты AR-систем и наиболее распространенным подходом является дополненная реальность на основе монитора, при которой предоперационная трехмерная модель, реконструированная по данным КТ/МРТ, совмещается с лапароскопическим изображением. Визуализация осуществляется либо путем наложения полупрозрачного слоя на основной экран, либо посредством вывода на отдельный монитор. Примером служит система SmartLiver, использующая оптическое слежение для проецирования контуров сосудистых структур и опухолевых образований непосредственно на монитор операционной [38].

Альтернативным решением являются голографические AR-очки, оснащенные прозрачным дисплеем, который располагается в поле зрения хирурга. Устройства данного типа, включая Microsoft HoloLens и Vuzix, позволяют выводить масштабированные голограммы анатомических структур с наложением на реального пациента [36, 39].

В контексте открытой хирургии печени AR-очки применялись для навигации при резекции опухолей. Так, исследование Golse и соавт. [15] продемонстрировало возможность маркерного совмещения трехмерной модели без существенных пространственных искажений, несмотря на дыхательные движения пациента во время операции [15].

Отдельные исследовательские группы использовали проекционные системы, основанные на применении проекторов или лазерных указателей, которые визуализируют контуры внутренних структур непосредственно на поверхности органа. Данный подход представлен в работах японских исследователей, посвященных технологии проекционного картирования на поверхность печени [12, 40].

Особый интерес представляет интеграция дополненной реальности с флуоресцентной визуализацией на основе индоцианина зеленого. Этот флуоресцентный краситель широко применяется для интраоперационной визуализации и позволяет идентифицировать сегменты печени при внутривенном введении перед операцией или опухолевые очаги при прямой инъекции в сосудистое русло либо вследствие естественной гиперфлуоресценции некоторых новообразований. Многие современные AR-системы интегрированы с режимом визуализации индоцианина зеленого в лапароскопической системе, что подробно описано в ряде китайских исследований [16, 41]. Флуоресцентная навигация существенно

упрощает процесс регистрации виртуальных моделей. Исследование Тао и соавт. [16] показало успешное применение комбинации AR и индоцианина зеленого при выполнении анатомической резекции восьмого сегмента печени.

Точность пространственного совмещения виртуальной модели с реальной анатомией представляет собой ключевой параметр, определяющий клиническую эффективность AR-навигации [42, 43]. В исследованиях применялись различные методы регистрации, включая совмещение по анатомическим ориентирам, по искусственным маркерам, фиксируемым на органе, или по облакам точек поверхности с использованием алгоритмов сравнения формы органа на предоперационной модели и интраоперационных данных. Наилучшие результаты с погрешностью менее 5 мм показали методы бесконтактного совмещения [44–46].

Вместе с тем необходимо учитывать, что любые перемещения органов, их деформация вследствие тракции лапароскопическими инструментами, а также наложение пневмоперитонеума могут снижать точность AR-навигации. В ряде исследований предложены решения данной проблемы посредством периодической рекалибровки в ходе операции или использования систем динамического трекинга с камерами глубины [46–48].

Таким образом, современные технологические решения в области AR-ассистированной хирургии характеризуются значительным разнообразием подходов к визуализации и регистрации виртуальных моделей, при этом ключевым направлением развития остается повышение точности и устойчивости пространственного совмещения в условиях интраоперационной динамики анатомических структур.

Клиническое значение AR в абдоминальной хирургии. Наиболее важным клиническим эффектом применения технологии дополненной реальности является снижение интраоперационной кровопотери. В подавляющем большинстве сравнительных исследований группа с AR-навигацией демонстрировала статистически значимо меньший объем кровопотери по сравнению с контрольной группой. Так, в работе Wang и соавт. [41] при выполнении лапароскопических резекций печени объем кровопотери в группе AR составил 100 против 200 мл в контрольной группе ($p = 0,005$), что авторы связывают с более точной визуализацией анатомических границ сегментов и сосудистых структур. В другом исследовании интраоперационная кровопотеря в группе AR была достоверно ниже и составила 300,8 против 320,76 мл в контрольной группе ($p = 0,002$) [3]. Сопоставимые результаты были получены Zhang и соавт. [7], Тао и соавт. [16], а также Wu и соавт. [18]. Применение AR-навигации позволяет хирургам избежать непреднамеренного пересечения сосудистых структур, своевременно выполнить их клипирование или обойти критические анатомические образования, что непосредственно отражается на объеме интраоперационной кровопотери.

Закономерным следствием снижения кровопотери является уменьшение потребности в гемотрансфузиях. Так, в исследовании Zhang и соавт. [7] переливание компонентов крови потребовалось 10% пациентов группы AR против 42% в контрольной группе ($p < 0,001$). По данным другого исследования, гемотрансфузия была выполнена 14,3% пациентов группы AR и 64,7% пациентов контрольной группы ($p < 0,01$) [13]. Таким образом, снижение интраоперационной кровопотери представляет собой клинически значимый эффект применения технологии дополненной реальности, который коррелирует с более благоприятным течением послеоперационного периода.

Применение AR-технологий в большинстве исследований не приводило к увеличению длительности операции, а в ряде случаев способствовало ее сокращению. В работе Javaheri и соавт. [49] показано, что средняя продолжительность операции в группе с использованием носимой AR-системы составила 246 минут по сравнению с 299 минутами в контрольной группе, при этом различия были статистически значимыми ($p = 0,004$). Аналогичные результаты получены в исследовании, показавшем уменьшение средней продолжительности лапароскопической резекции печени приблизительно на 10% при использовании AR-технологий ($p = 0,013$) [3]. Вероятным объяснением данного эффекта служит тот факт, что дополненная реальность позволяет хирургу более уверенно следовать оптимальным плоскостям резекции, минимизируя время на дополнительные манипуляции.

Вместе с тем не во всех работах отмечается сокращение операционного времени. В отдельных сериях наблюдений без контрольной группы зафиксировано незначительное увеличение длительности вмешательства, обусловленное затратами времени на установку AR-системы и первичную калибровку [38]. Тем не менее по мере совершенствования технологии время настройки сокращается, что нивелирует влияние на общую продолжительность операции. В недавнем систематическом обзоре Brockmeyer и соавт. [10] показано, что AR-технологии в целом способны сокращать операционное время за счет улучшения эргономики работы хирурга.

Данные о радикальности онкологических резекций и долгосрочных результатах лечения злокачественных новообразований пока ограничены, однако представляются обнадеживающими. В исследовании Wang и соавт. [41] хирургическое лечение рака печени с применением AR-технологий привело к статистически значимому улучшению трехлетней безрецидивной выживаемости (70 против 52%, $p = 0,047$). Все пациенты в AR-группе имели R0-резекцию (0% позитивных краев резекции), тогда как в контрольной группе микроскопически позитивные края выявлены у 20% больных [41]. Это свидетельствует о том, что дополненная реальность может способствовать более точному выполнению онкологически адекватного объема резекции. Косвенным подтверждением служит также снижение частоты остаточной ишемии печеночной

ткани (13 против 30% в контрольной группе) – признак корректного проведения сегментарной границы без повреждения смежных зон кровоснабжения [41]. Безусловно, долгосрочные онкологические результаты зависят от множества факторов, и в настоящее время таких данных недостаточно, что диктует необходимость проведения рандомизированных контролируемых исследований.

Частота и характер послеоперационных осложнений являются ключевыми показателями, определяющими практическую ценность технологии. В большинстве исследований применение AR не сопровождается увеличением частоты послеоперационных осложнений, включая тяжелые осложнения III–IV степени по классификации Clavien – Dindo. В ряде работ отмечена тенденция к снижению частоты осложнений. Так, в исследовании Wang и соавт. [3] осложнения возникли у 4% пациентов в AR-группе по сравнению с 8,7% в контрольной группе ($p = 0,598$). При резекциях поджелудочной железы применение AR также ассоциировалось с потенциально меньшей частотой осложнений. Javaheri и соавт. [49] сообщили о развитии свища поджелудочной железы лишь в 2 случаях в AR-группе (10,6%) против 9 случаев (17,6%) в контрольной группе ($p = 0,739$). Результаты данного исследования подтверждаются данными других авторов [18]. Исследователи связывают подобные результаты с более бережной диссекцией и прецизионным выделением артерий поджелудочной железы благодаря наложению виртуальной модели сосудов во время операции, что, вероятно, способствовало снижению травматизации тканей и сохранению адекватного кровоснабжения органа.

Применение AR-технологий также ассоциировалось с уменьшением продолжительности послеоперационной госпитализации. По данным ряда исследований, использование дополненной реальности статистически значимо сокращает длительность госпитализации после оперативного вмешательства. Это свидетельствует о том, что AR-технологии способствуют более быстрому восстановлению пациентов после хирургического лечения, повышают пропускную способность стационара и обеспечивают экономическую эффективность [7, 13, 18].

Необходимо отметить вопросы безопасности, связанные с применением AR. Хотя сама по себе технология является неинвазивной, существует риск того, что избыточная информация на дисплее может перегружать внимание хирурга. В одном из экспериментальных исследований было показано, что хирурги, полагающиеся на некорректную AR-визуализацию, могут проявлять избыточную уверенность и совершать ошибки вследствие ложного чувства безопасности [50]. В связи с этим важными являются интуитивность интерфейса и минимизация визуального шума. Существенное значение имеет также обучение хирургов. Как отмечают Brockmeyer и соавт. [10], AR-навигация не обеспечивает автоматического повышения точности при отсутствии у пользователя

соответствующих навыков, однако при надлежащем уровне подготовки она приносит значительную пользу, улучшая эргономику и визуализацию анатомических структур.

Таким образом, можно сказать, что клиническая значимость технологий дополненной реальности в абдоминальной хирургии подтверждается улучшением ряда важных показателей. К ним относятся снижение интраоперационных рисков (кровопотеря, ятрогенные повреждения анатомических структур), повышение качества выполнения хирургических вмешательств (радикальность резекций, соблюдение анатомических границ резекции), оптимизация операционного процесса (сокращение длительности операции) и ускорение послеоперационного восстановления. Наиболее отчетливые преимущества применения AR-технологий отмечаются в сложных клинических ситуациях, например, при анатомически труднодоступной локализации новообразований, множественных очаговых поражениях и вариативной анатомии сосудистых структур.

Вместе с тем необходимо отметить, что уровень доказательности имеющихся на сегодня данных остается недостаточно высоким. Значительная часть исследований представляет собой одноцентровые работы с ограниченным объемом выборки. Требуется проведение дальнейших исследований для преодоления существующих технических ограничений и получения убедительных доказательств клинической пользы для пациентов. В частности, нерешенными остаются вопросы стандартизации AR-технологий: разработка единых протоколов совмещения виртуальных изображений с операционным полем, интеграция с робот-ассистированными хирургическими системами, обеспечение отказоустойчивости (действия хирурга при потере точности навигации на критических этапах вмешательства) [8, 29]. Необходимо также учитывать экономические и организационные аспекты внедрения, то есть высокую стоимость оборудования, необходимость специализированного обучения персонала, увеличение времени предоперационной подготовки. В настоящее время AR-оборудование остается дорогостоящим и доступно преимущественно крупным специализированным центрам [29]. В перспективе по мере удешевления технологий они могут войти в рутинную клиническую практику аналогично интраоперационному ультразвуковому исследованию или флюоресцентной навигации с индоцианином зеленым.

Заключение

Дополненная реальность в абдоминальной хирургии за последние десятилетия трансформировалась из экспериментальной концепции в практически значимую технологию. Анализ современных исследований показывает, что применение AR-навигации в операционной обеспечивает ряд клинически важных преимуществ. К ним относятся снижение интраоперационной кровопотери и потребности в гемотрансфузиях, сокращение продолжительности оперативных

вмешательств и периода госпитализации, повышение уверенности хирурга при выполнении сложных манипуляций и, что наиболее важно, потенциальное улучшение радикальности и безопасности операций. Особенно убедительные результаты получены в лапароскопической хирургии печени и поджелудочной железы, где AR позволяет визуализировать критические анатомические структуры сквозь паренхиму органа. Следует признать, что доказательная база остается ограниченной, однако перспективы применения AR в хирургии представляются весьма широкими. В ближайшем будущем ожидается интеграция AR с другими цифровыми технологиями, например, искусственным интеллектом для автоматического распознавания анатомических структур и патологических очагов в режиме реального времени, роботическими системами для проецирования траектории движения инструментов, а также телехирургией, позволяющей опытному хирургу-наставнику дистанционно визуализировать операционное поле с помощью AR-технологий и координировать действия операционной бригады. По мере накопления клинических данных и снижения стоимости технологий можно прогнозировать, что AR станет неотъемлемым компонентом хирургических вмешательств, который будет обеспечивать повышение их точности и персонализацию подхода к каждому пациенту.

Конфликт интересов: автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования: автор заявляет о финансировании проведенного исследования из собственных средств.

Литература / References

1. Ramalhinho J, Yoo S, Dowrick T, Koo B, Somasundaram M, Gurusamy K, Hawkes DJ, Davidson B, Blandford A, Clarkson MJ. The value of augmented reality in surgery – A usability study on laparoscopic liver surgery. *Med Image Anal.* 2023;90:102943. doi: 10.1016/j.media.2023.102943
2. Демин Д.Б. Первый опыт применения технологии дополненной реальности в лапароскопической хирургии надпочечников. *Эндоскопическая хирургия.* 2024;30(1):51–54. [Demin DB. Initial experience of the augmented reality technology in laparoscopic adrenal surgery. *Endoscopic Surgery.* 2024;30(1):51–54 (In Russ.).] doi: 10.17116/endoskop20243001151
3. Wang P, Wang S, Luo P. Evaluation of the effectiveness of preoperative 3D reconstruction combined with intraoperative augmented reality fluorescence guidance system in laparoscopic liver surgery: A retrospective cohort study. *BMC Surg.* 2025 Jul 4;25(1):288. doi: 10.1186/s12893-025-02989-4
4. Shen Y, Wang S, Shen Y, Hu J. The application of augmented reality technology in perioperative visual guidance: Technological advances and innovation challenges. *Sensors.* 2024;24(22):7363. doi: 10.3390/s24227363
5. Oh MY, Yoon KC, Kong HJ, Jang T, Choi Y, Kim J, Kim JY, Choi Y, Chai YJ. Leveraging augmented reality for dynamic guidance in 3-dimensional laparoscopic and robotic liver surgery: A prospective case series study. *Ann Surg Treat Res.* 2025;109(1):44–52. doi: 10.4174/astr.2025.109.1.44
6. Bertrand LR, Abdallah M, Espinel Y, Calvet L, Pereira B, Ozgur E, Pezet D, Buc E, Bartoli A. A case series study of augmented

- reality in laparoscopic liver resection with a deformable preoperative model. *Surg Endosc.* 2020;34(12):5642–5648. doi: 10.1007/s00464-020-07815-x
7. Zhang W, Zhu W, Yang J, Xiang N, Zeng N, Hu H, Jia F, Fang C. augmented reality navigation for stereoscopic laparoscopic anatomical hepatectomy of primary liver cancer: preliminary experience. *Front Oncol.* 2021;11:663236. Published 2021 Mar 25. doi: 10.3389/fonc.2021.663236
 8. Malhotra S, Halabi O, Dakua SP, Padhan J, Paul S, Palliyali W. Augmented reality in surgical navigation: a review of evaluation and validation metrics. *Applied Sciences.* 2023; 13(3):1629. doi: 10.3390/app13031629
 9. Zhao Z, Poyhonen J, Chen Cai X, Sophie Woodley Hooper F, Ma Y, Hu Y, Ren H, Song W, Tsz Ho Tse Z. Augmented reality technology in image-guided therapy: State-of-the-art review. *Proc Inst Mech Eng H.* 2021;235(12):1386–1398. doi: 10.1177/09544119211034357
 10. 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. Published 2023 Apr 21. doi: 10.3390/bioengineering10040501
 11. Ribeiro M, Espinel Y, Rabbani N, Pereira B, Bartoli A, Buc E. Augmented Reality guided laparoscopic liver resection: a phantom study with intraparenchymal tumors. *J Surg Res.* 2024;296:612–620. doi: 10.1016/j.jss.2023.12.014
 12. Kasai M, Uchiyama H, Aihara T, Ikuta S, Yamanaka N. Laparoscopic projection mapping of the liver portal segment, based on augmented reality combined with Artificial Intelligence, for laparoscopic anatomical liver resection. *Cureus.* 2023;15(11):e48450. Published 2023 Nov 7. doi: 10.7759/cureus.48450
 13. Zhu W, Zeng X, Hu H, Xiang N, Zeng N, Wen S, Tian J, Yang J, Fang C. Perioperative and disease-free survival outcomes after hepatectomy for centrally located hepatocellular carcinoma guided by augmented reality and indocyanine green fluorescence imaging: a single-center experience. *J Am Coll Surg.* 2023;236(2):328–337. doi: 10.1097/XCS.0000000000000472
 14. Martinet-Kosinski F, Le Roy B, Lopez YE, Bartoli A, Buc E. Improved tumour localisation during minimally invasive liver surgery using augmented reality: a retrospective study with propensity score analysis. *Surg Endosc.* 2025;39(8):5027–5034. doi: 10.1007/s00464-025-11672-x
 15. Golse N, Petit A, Lewin M, Vibert E, Cotin S. Augmented reality during open liver surgery using a markerless non-rigid registration system. *J Gastrointest Surg.* 2021;25(3):662–671. doi: 10.1007/s11605-020-04519-4
 16. Tao H, Wang Z, Zeng X, Hu H, Li J, Lin J, Lin W, Fang C, Yang J. Augmented Reality navigation plus indocyanine green fluorescence imaging can accurately guide laparoscopic anatomical segment 8 resection. *Ann Surg Oncol.* 2023;30(12):7373–7383. doi: 10.1245/s10434-023-14126-7
 17. Deng H, Zeng X, Xiang N. Augmented Reality navigation system and indocyanine green fluorescence imaging make laparoscopic right anterior sectionectomy more precisely and safely. *J Gastrointest Surg.* 2023;27(8):1751–1752. doi: 10.1007/s11605-023-05680-2
 18. Wu X, Wang D, Xiang N, Pan M, Jia F, Yang J, Fang C. Augmented reality-assisted navigation system contributes to better intraoperative and short-time outcomes of laparoscopic pancreaticoduodenectomy: a retrospective cohort study. *Int J Surg.* 2023;109(9):2598–2607. Published 2023 Sep 1. doi: 10.1097/J9.0000000000000536
 19. Javaheri H, Ghamarnejad O, Bade R, Lukowicz P, Karolus J, Stavrou GA. Beyond the visible: preliminary evaluation of the first wearable augmented reality assistance system for pancreatic surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2025;20(1):117–129. doi:10.1007/s11548-024-03131-0
 20. Templin R, Tabriz N, Hoffmann M, Uslar VN, Lück T, Schenk A, Malaka R, Zachmann G, Kluge A, Weyhe D. Case report: Virtual and interactive 3D vascular reconstruction before planned pancreatic head resection and complex vascular anatomy: A bench-to bedside transfer of new visualization techniques in pancreatic surgery. *Front Surg.* 2020;7:38. Published 2020 Jun 18. doi: 10.3389/fsurg.2020.00038
 21. Cremades Pérez M, Espin Álvarez F, Pardo Aranda F, Navinés López J, Vidal Piñeiro L, Zarate Pinedo A, Piquera Hinojo AM, Sentí Farrarons S, Cugat Andorra E. Augmented reality in hepatobiliary-pancreatic surgery: a technology at your fingertips. *Cir Esp (Engl Ed).* 2023;101(5):312–318. doi: 10.1016/j.cireng.2023.02.004
 22. Prasad K, Fassler C, Miller A, Aweeda M, Pruthi S, Fusco JC, Daniel B, Miga M, Wu JY, Topf MC. More than meets the eye: Augmented reality in surgical oncology. *J Surg Oncol.* 2024;130(3):405–418. doi: 10.1002/jso.27790
 23. Roussel E, Pinson J, Duhamel L, Martre P, Kerdelhué G, Tuech JJ, Schwarz L. Value of 3D reconstructions in pancreatic surgery: Current status. *J Visc Surg.* Published online October 21, 2025. doi: 10.1016/j.jvisc.2025.09.011
 24. Laga Boul-Atarass I, Cepeda Franco C, Sanmartín Sierra JD, Castell Monsalve J, Padillo Ruiz J. Virtual 3D models, augmented reality systems and virtual laparoscopic simulations in complicated pancreatic surgeries: state of art, future perspectives, and challenges. *Int J Surg.* 2025;111(3):2613–2623. Published 2025 Mar 1. doi: 10.1097/J9.0000000000002231
 25. Святненко А.В., Демко А.Е., Суров Д.А., Батиг Е.В., Сизоненко Н.А., Мартынова Г.В., Есаян И.Л. Первый опыт применения технологии дополненной цифровой реальности (AR) в реконструктивной хирургии желчных протоков. *Вестник НМХЦ им. Н.И. Пирогова.* 2024;19(2):159–163. [Svyatnenko AV, Demko AE, Surov DA, Batig EV, Sizonenko NA, Martynova GV, Esayan IL. The first experience of using augmented reality (AR) technology in reconstructive surgery of the bile ducts. *Bulletin of Pirogov National Medical & Surgical Center.* 2024;19(2):159–163 (In Russ.)]. doi:10.25881/20728255_2024_19_2_159
 26. Kitagawa M, Sugimoto M, Haruta H, Umezawa A, Kurokawa Y. Intraoperative holography navigation using a mixed-reality wearable computer during laparoscopic cholecystectomy. *Surgery.* 2022;171(4):1006–1013. doi: 10.1016/j.surg.2021.10.004
 27. Pardo F, Vidal L, Cremades M, Cugat E. Robotic cholecystectomy and transcystic common bile duct exploration with augmented reality glasses and indocyanine green in a patient with a cystic duct cyst. *Cir Esp (Engl Ed).* 2023;101(8):562–563. doi: 10.1016/j.cireng.2022.11.002
 28. Wild C, Lang F, Gerhäuser AS, Schmidt MW, Kowalewski KF, Petersen J, Kennigott HG, Müller-Stich BP, Nickel F. Telestration with augmented reality for visual presentation of intraoperative target structures in minimally invasive surgery: a randomized controlled study. *Surg Endosc.* 2022;36(10):7453–7461. doi: 10.1007/s00464-022-09158-1
 29. Barcali E, Iadanza E, Manetti L, Francia P, Nardi C, Bocchi L. Augmented Reality in Surgery: A Scoping Review. *Applied Sciences.* 2022;12(14):6890. doi: 10.3390/app12146890
 30. Heiliger C, Heiliger T, Deodati A, Winkler A, Grimm M, Kalim F, Esteban J, Mihatsch L, Hiendl L, Andrade D, Frank A, Jacob S, Mohamed KA, Solyanik O, Mandal S, Werner J, Eck U, Navab N, Karcz K. Phantom study on surgical performance in augmented reality laparoscopy. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2023;18(8):1345–1354. doi: 10.1007/s11548-022-02809-7
 31. Metzger R, Suppa P, Li Z, Vemuri A. Augmented reality navigation systems in endoscopy. *Front Gastroenterol.* 2024;3:1345466. doi: 10.3389/fgstr.2024.1345466
 32. Broderick RC, Spurzem GJ, Jeffery Reeves J, Hollandsworth HM, Sandler BJ, Jacobsen GR, Longhurst CA, Horgan S. First use of augmented reality headset in minimally invasive general surgery: seeing is believing. *Surg Endosc.* 2025;39(9):6055–6060. doi: 10.1007/s00464-025-11985-x
 33. Ryu S, Kitagawa T, Goto K, Okamoto A, Marukuchi R, Hara K, Ito R, Nakabayashi Y. Intraoperative holographic guidance using

- virtual reality and mixed reality technology during laparoscopic colorectal cancer surgery. *Anticancer Res.* 2022;42(10):4849–4856. doi: 10.21873/anticancer.15990
34. Bracale U, Iacone B, Tedesco A, Gargiulo A, Di Nuzzo MM, Sannino D, Tramontano S, Corcione F. The use of mixed reality in the preoperative planning of colorectal surgery: Preliminary experience with a narrative review. *Cir Esp (Engl Ed)*. 2024;102 Suppl 1:S36–S44. doi: 10.1016/j.cireng.2024.01.006
35. Richter A, Steinmann T, Rosenthal JC, Rupitsch SJ. Advances in real-time 3D reconstruction for medical endoscopy. *J Imaging*. 2024;10(5):120. Published 2024 May 14. doi: 10.3390/jimaging10050120
36. Doughty M, Ghugre NR, Wright GA. Augmenting performance: A systematic review of optical see-through head-mounted displays in surgery. *Journal of Imaging*. 2022;8(7):203. doi: 10.3390/jimaging8070203
37. Sang AY, Wang X, Paxton L. Technological advancements in augmented, mixed, and virtual reality technologies for surgery: A systematic review. *Cureus*. 2024;16(12):e76428. Published 2024 Dec 26. doi: 10.7759/cureus.76428
38. Ramalhinho J, Bulathsinhala S, Gurusamy K, Davidson BR, Clarkson MJ. Assessing augmented reality displays in laparoscopic liver surgery – a clinical experience. *Surg Endosc*. 2025;39(9):5863–5871. doi: 10.1007/s00464-025-12008-5
39. Tătaru OS, Ferro M, Marchioni M, Veccia A, Coman O, Lasorsa F, Brescia A, Crocetto F, Barone B, Catellani M, Lazar A, Petrisor M, Vartolomei MD, Lucarelli G, Antonelli A, Schips L, Autorino R, Rocco B, Azamfirei L. HoloLens® platform for healthcare professionals simulation training, teaching, and its urological applications: an up-to-date review. *Ther Adv Urol*. 2024;16:17562872241297554. Published 2024 Dec 8. doi: 10.1177/17562872241297554
40. Espinel Y, Rabbani N, Bui TB, Ribeiro M, Buc E, Bartoli A. Keyhole-aware laparoscopic augmented reality. *Med Image Anal*. 2024;94:103161. doi: 10.1016/j.media.2024.103161
41. Wang D, Hu H, Zhang Y, Wu X, Zeng X, Yang J, Fang C. Efficacy of augmented reality combined with indocyanine green fluorescence imaging guided laparoscopic segmentectomy for hepatocellular carcinoma. *J Am Coll Surg*. 2024;238(3):321–330. doi: 10.1097/XCS.0000000000000912
42. Sheriff NJ, Thomas M, Bunck AC, Peterhans M, Datta RR, Hellmich M, Bruns CJ, Stippel DL, Wahba R. Registration accuracy comparing different rendering techniques on local vs external virtual 3D liver model reconstruction for vascular landmark setting by intraoperative ultrasound in augmented reality navigated liver resection. *Langenbecks Arch Surg*. 2024;409(1):268. Published 2024 Sep 3. doi: 10.1007/s00423-024-03456-z
43. Teatini A, Pérez de Frutos J, Eigl B, Pelanis E, Aghayan DL, Lai M, Kumar RP, Palomar R, Edwin B, Elle OJ. Influence of sampling accuracy on augmented reality for laparoscopic image-guided surgery. *Minim Invasive Ther Allied Technol*. 2021;30(4):229–238. doi: 10.1080/13645706.2020.1727524
44. Teatini A, Pelanis E, Aghayan DL, Kumar RP, Palomar R, Fretland ÅA, Edwin B, Elle OJ. The effect of intraoperative imaging on surgical navigation for laparoscopic liver resection surgery. *Sci Rep*. 2019;9(1):18687. Published 2019 Dec 10. doi: 10.1038/s41598-019-54915-3
45. Wang E, Liu Y, Tu P, Taylor ZA, Chen X. Video-Based Soft Tissue Deformation Tracking for Laparoscopic Augmented Reality-Based Navigation in Kidney Surgery. *IEEE Trans Med Imaging*. 2024;43(12):4161–4173. doi: 10.1109/TMI.2024.3413537
46. Doornbos MJ, Peek JJ, Maat APWM, Ruurda JP, De Backer P, Cornelissen BMW, Mahtab EAF, Sadeghi AH, Kluin J. Augmented Reality Implementation in Minimally Invasive Surgery for Future Application in Pulmonary Surgery: A Systematic Review. *Surg Innov*. 2024;31(6):646–658. doi: 10.1177/15533506241290412
47. Yang S, Wang Y, Ai D, Geng H, Zhang D, Xiao D, Song H, Li M, Yang J. Augmented reality navigation system for biliary interventional procedures with dynamic respiratory motion correction. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2024;71(2):700–711. doi: 10.1109/TBME.2023.3316290
48. Göbel B, Reiterer A, Möller K. Image-based 3D reconstruction in laparoscopy: A review focusing on the quantitative evaluation by applying the reconstruction error. *Journal of Imaging*. 2024;10(8):180. doi: 10.3390/jimaging10080180
49. Javaheri H, Ghamarnejad O, Widyarningsih R, Bade R, Lukowicz P, Karolus J, Stavrou GA. Enhancing perioperative outcomes of pancreatic surgery with wearable augmented reality assistance system: A matched-pair analysis. *Ann Surg Open*. 2024;5(4):e516. Published 2024 Nov 5. doi: 10.1097/AS9.0000000000000516
50. Roman J, Sengul I, Němec M, Sengul D, Penhaker M, Strakoš P, Vávra P, Hrubovčák J, Pelikán A. Augmented and mixed reality in liver surgery: a comprehensive narrative review of novel clinical implications on cohort studies. *Rev Assoc Med Bras (1992)*. 2025;71(6):e20250315. Published 2025 Jul 7. doi: 10.1590/1806-9282.20250315