

DOI: 10.15825/1995-1191-2026-2-238-249

ЭВОЛЮЦИЯ МОДЕЛЕЙ В УРОЛОГИЧЕСКОЙ ХИРУРГИИ И ТРАНСПЛАНТОЛОГИИ: ОТ ЛАБОРАТОРНЫХ ЖИВОТНЫХ ДО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

С.В. Попов¹⁻³, Р.Г. Гусейнов^{1, 3}, К.И. Стосман⁴, К.В. Сивак^{1, 4},

Т.Н. Саватеева-Любимова⁴, Е.А. Малышев¹, А.Х. Бештоев¹, Т.А. Лелявина^{1, 5}

¹ СПб ГБУЗ «Клиническая больница Святителя Луки», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» Минобороны России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ЧОУ ВО «Санкт-Петербургский медико-социальный институт», Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ ФГБУ «Научно-исследовательский институт гриппа имени А.А. Смородинцева», Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁵ ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» Минздрава России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Актуальность. Эксперименты на животных играют важную роль в современной хирургии, позволяют разработать новые операционные техники, материалы для трансплантатов и др. Помимо животных в современной хирургии и трансплантологии активно используются роботизированные системы и искусственный интеллект, способные минимизировать интраоперационные кровопотери, частоту раневых инфекций, осуществить подбор «донор–реципиент», прогнозировать выживаемость трансплантата и многое др. **Цель:** анализ эволюции хирургических моделей *in vivo* и оценка современных стратегий трансплантации и эксплантации. **Материалы и методы.** Поиск литературы в базе данных Scopus, PubMed и РИНЦ с использованием поискового запроса «хирургические модели на животных», «трансплантация почки», «ксенотрансплантация», «искусственный интеллект в трансплантологии и хирургии», «роботизированная хирургия». Проанализировано 430 публикаций в отечественных и зарубежных журналах за 2006–2025 гг. В результате отбора в обзор были включены 87 публикаций. Прослежена трансформация от анатомических исследований к сложным хирургическим системам. Ключевым этапом стало внедрение моделей для трансплантации почки на крупных животных (свиньях). Современный этап характеризуется интеграцией роботических систем и искусственного интеллекта, обеспечивающих минимальную инвазивность и точность. **Заключение.** Проведение испытаний на лабораторных животных необходимо, особенно при выполнении хирургических операций, моделирование которых математически невозможно.

Ключевые слова: хирургические модели *in vivo*, трансплантация почки, роботизированная хирургия, искусственный интеллект, машинная перфузия, ксенотрансплантация, эксплантация *ex vivo*.

Для корреспонденции: Лелявина Татьяна Александровна. Адрес: 198515, Санкт-Петербург, Стрельна, ул. Декабристов, д. 6. Тел. (981) 908-90-18. E-mail: tatianalelyavina@mail.ru

Corresponding author: Tatiana Lelyavina. Address: 6, Dekabristov str., Strelna, St. Petersburg, 198515, Russian Federation. Phone: (981) 908-90-18. E-mail: tatianalelyavina@mail.ru

EVOLUTION OF MODELS IN UROLOGICAL SURGERY AND TRANSPLANTOLOGY: FROM LABORATORY ANIMALS TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE

S.V. Popov¹⁻³, R.G. Huseynov^{1, 3}, K.I. Stosman⁴, K.V. Sivak^{1, 4}, T.N. Savateeva-Lyubimova⁴, E.A. Malyshev¹, A.Kh. Beshtoev¹, T.A. Lelyavina^{1, 5}

¹ St. Luke's Clinical Hospital, St. Petersburg, Russian Federation

² Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russian Federation

³ St. Petersburg Medical and Social Institute, St. Petersburg, Russian Federation

⁴ Smorodintsev Research Institute of Influenza, St. Petersburg, Russian Federation

⁵ Almazov National Medical Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

Background. Animal experiments play a vital role in modern surgery, enabling the development of new surgical techniques, transplant materials, and more. In addition, modern surgery and transplant medicine utilize robotic systems and artificial intelligence to minimize intraoperative blood loss and wound infections, facilitate donor–recipient matching, and predict graft survival. **Objective:** to analyze the evolution of *in vivo* surgical models and evaluate modern strategies for transplantation and explantation. **Materials and methods.** A literature search was conducted in the SCOPUS, PubMed, and the Russian Science Citation Index (RSCI) databases using the following search terms: «хирургические модели на животных» (meaning «animal surgical models» in English), «трансплантация почки» (kidney transplantation), «ксенотрансплантация» (xenotransplantation), «искусственный интеллект в трансплантологии и хирургии» (artificial intelligence in transplantology and surgery) and «роботизированная хирургия» (robot-assisted surgery). A total of 430 publications from Russian and international journals published between 2006 and 2025 were analyzed. Following the selection process, 87 publications were included in the review. The evolution from anatomical studies to complex surgical systems was traced, with a key milestone being the introduction of kidney transplantation models in large animals (pigs). The current stage is characterized by integration of robotic systems and artificial intelligence, ensuring minimal invasiveness and high precision. **Conclusion.** Testing on laboratory animals remains essential, particularly for surgical procedures that cannot be adequately modeled mathematically.

Keywords: *in vivo surgical models, kidney transplantation, robot-assisted surgery, artificial intelligence, machine perfusion, xenotransplantation, ex vivo explantation.*

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция хирургических моделей трансплантации почки берет свое начало от первых операций с использованием трупных органов, которые стали выполнять в 1930-х годах. Позже, в 1954 году, в Бостоне была проведена успешная операция по пересадке почки от одного однояйцевого близнеца другому. Пациент прожил после этого несколько лет.

В настоящее время хирургические методы трансплантации органов претерпели значительные изменения, где физиологическая точность приоритетнее простоты [1]. Основное внимание уделяется исследованию механизмов ключевых процессов (иммунологические реакции, биохимические процессы, молекулярно-генетические механизмы, физиологические процессы, клеточные механизмы, технологические процессы, фармакокинетические механизмы) [2, 3], рассмотрению методологических подходов к проведению экспериментов и оценке практического применения полученных результатов в различных областях науки и техники. Современная урологическая хирургия, в особенности трансплантология, харак-

теризуется стремительной интеграцией технологических инноваций, что кардинально трансформирует доклинические исследования и хирургическую практику [4, 5]. Эволюция хирургических моделей для трансплантации и эксплантации *in vivo* изменила доклинические исследования благодаря технологической интеграции, усовершенствованным биологическим стратегиям и междисциплинарным инновациям [6]. Ключевой вызов заключается в преодолении разрыва между экспериментальными данными и клиническим применением, что требует разработки высокоточных хирургических моделей [7, 8]. Настоящий обзор фокусируется на эволюции таких моделей в контексте урологии с акцентом на трансплантацию почки [9–11], биоинженерию и развитие минимально инвазивных технологий, активно привлекая опыт смежных хирургических дисциплин.

В настоящее время методы *ex vivo* являются дополнением к экспериментам на животных [12]. Они позволяют проводить высокоточные исследования на человеко-релевантном материале, снижая количество используемых лабораторных животных в соответствии с принципом *Replacement*, и служат

важным промежуточным звеном между исследованиями *in vivo* и клинической практикой. Поэтому в обзоре также рассматриваются ключевые стратегии эксплантации, которые либо напрямую используются в качестве альтернативы *in vivo*-моделированию, либо являются критически важным этапом подготовки и оценки в рамках комплексных доклинических исследований, включающих последующую *трансплантацию in vivo* [13], искусственный интеллект и интеграцию с платформами *ex vivo* [14]. Настоящий обзор систематизирует эти этапы, прослеживая, как изменение целей и возможностей доклинических исследований закономерно трансформировало требования к хирургическим моделям, делая их все более комплексными, минимизированными и человеко-ориентированными, вплоть до новейших подходов, таких как ксенотрансплантация и изучение психологических аспектов у реципиентов.

Таким образом, эволюционный подход к анализу хирургических моделей *in vivo* предполагает рассмотрение не изолированных технологий, а последовательной смены взглядов: от грубых анатомических исследований через становление физиологически релевантных и этичных моделей к эре высокоточных технологий, включая роботизацию, искусственный интеллект и интеграцию с платформами *ex vivo*.

Цель данного обзора – анализ эволюции хирургических моделей *in vivo* и оценка современных стратегий трансплантации и эксплантации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для анализа опубликованных результатов научных исследований нами была использована методология (рис.), включающая разработку критериев соответствия с использованием стратегии PICOS; систематический поиск и отбор литературы в соответствии с принципами *PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)* – предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов); извлечение данных и оценка их качества [15]; синтез и анализ данных с применением *TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving)* – теория решения изобретательских задач [16]; интерпретация результатов и формулировка выводов; включение проанализированных данных в обзор. В результате поиска в наукометрических базах данных Scopus, PubMed и РИНЦ из 430 первоначально идентифицированных публикаций после двухуровневого скрининга было отобрано 87 релевантных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

История использования хирургических моделей в экспериментах *in vivo* берет начало в Древней Греции, где животных использовали преимущественно

для анатомических исследований. Со временем они стали неотъемлемым инструментом доклинических испытаний в хирургии [17]. Знаковым этапом стало осознание необходимости воспроизведения не только анатомической, но и патофизиологической точности. В XX веке произошел постепенный переход от простых моделей к сложным, с фокусом на физиологическом подобии. Это особенно ярко проявилось в урологии, где трансплантация почки стала основным методом лечения терминальной стадии почечной недостаточности (ТСПН) [18]. Первые успешные трансплантации положили начало активному поиску оптимальных моделей для отработки хирургической техники и для изучения иммунного ответа организма на трансплантированный орган. Важным историческим поворотом стало внедрение принципа «3R» (*replacement, reduction, refinement*), который сформулировал этическую и методологическую концепцию работы с животными и потребовал тщательного обоснования выбора модели в зависимости от целевого показателя: исследования биосовместимости или оценки эффективности терапии [17].

К концу XX – началу XXI века с развитием микрохирургических технологий и появлением минимально инвазивной хирургии началась новая эра. Использование роботических систем при выполнении хирургических вмешательств произвело революцию в проведении сложных операций [19]. С момента первой успешной трансплантации почки на различных этапах имплантации почечного трансплантата было внедрено множество инноваций, включая усовершенствованные методы наложения сосудистых и мочевых анастомозов, позиционирования трансплантата [20]. Отправной точкой для современной роботизированной урологии считается первая полностью роботизированная трансплантация почки человека, выполненная в 2010 году [21]. Это событие ознаменовало переход к малоинвазивным подходам в трансплантологии. Дальнейшее развитие, включая создание европейского консорциума *ERUS-RAKT (European Robotic Urology Society – Robot-Assisted Kidney Transplantation)*: европейский консорциум, созданный для разработки, изучения и продвижения метода робот-ассистированной трансплантации почки), наработки практического опыта более чем на 600 вмешательствах, подтвердило безопасность и эффективность метода, сделав его стандартом в ведущих центрах, занимающихся трансплантацией почек [21]. Параллельно с хирургическими технологиями развивалось и направление искусственного интеллекта (ИИ). Его история применения в трансплантологии почки берет начало в 1960–1980-х годах с внедрения машинного обучения для разработки иммуносупрессивных препаратов и мониторинга. Концепция глубокого обучения, представленная в 2006 году, и последующий бум технологий после

2010 года, включая появление *ChatGPT* (*Chat – Generative Pre-trained Transformer*: генерирующий предварительно обученный трансформер), сыграли решающую роль в обработке больших данных и оптимизации клинических процессов, что привело к стремительному развитию приложений ИИ с 2017 года [18, 22, 23].

Учитывая вышеизложенное, становится очевидным, что историческое развитие хирургических моделей и технологий в урологии представляет собой поступательное движение от фундаментальных анатомических исследований через становление этических стандартов и разработку микрохирургических техник к текущей эре интеграции роботических

систем и искусственного интеллекта, определяющей будущее точной и персонализированной трансплантологии.

Модели трансплантации почки: от грызунов к крупным животным

Трансплантация почки является основным методом лечения терминальной стадии почечной недостаточности (ТСПН), однако по-прежнему существуют проблемы с подбором донора и реципиента, послеоперационным уходом и иммуносупрессивной терапией [18].

Исторически модели на грызунах доминировали в исследованиях по изучению иммунных механиз-

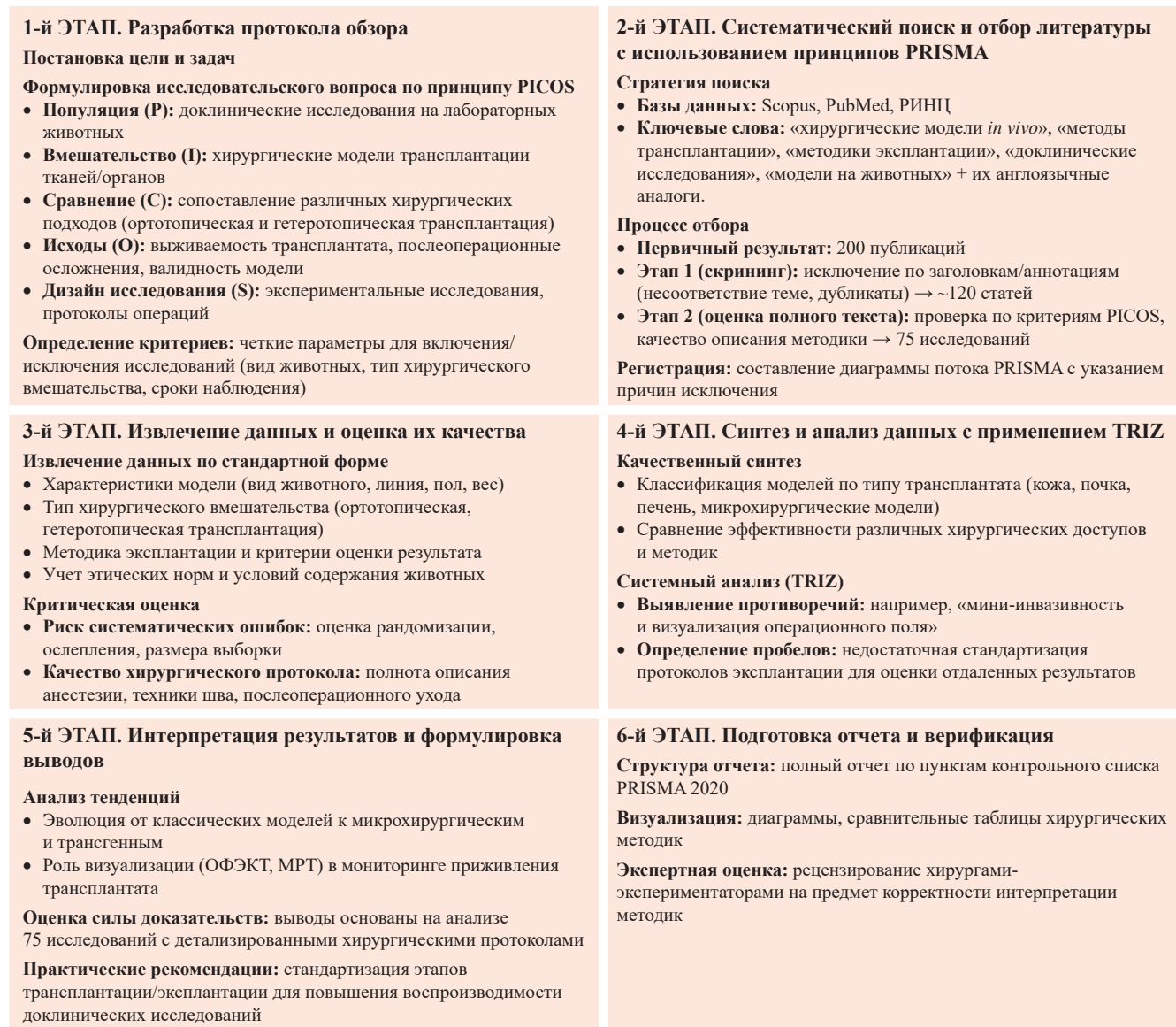


Рис. Блок-схема методологии научного обзора. TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) – теория решения изобретательских задач; PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) – предпочтительные элементы отчетности для систематических обзоров и метаанализов

Fig. Flowchart of the scientific review methodology. TRIZ (Theory of Inventive Problem Solving) – a framework for solving inventive problems; PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) – a guideline for reporting systematic reviews and meta-analyses

мов, почечной гипертензии, механизмов отторжения [24, 76]. Так, ортотопическая модель трансплантации почки у крысы используется для изучения различных аспектов трансплантации почки, таких как острое, хроническое, клеточное или антителоопосредованное отторжение [77, 78]. Модель васкуляризированной трансплантации почек, выполняемая на мышах, – для изучения механизмов толерантности и отторжения трансплантата, ишемически-реперфузионного повреждения [79, 80].

Модели на мелких животных являются предпочтительными для исследований, подтверждающих концепцию и разработку протоколов, но, к сожалению, часто не подходят для клинического применения. Для отработки хирургической техники, оценки жизнеспособности трансплантата и изучения долгосрочных осложнений необходимы модели, воспроизводящие анатомо-физиологические особенности человека. Первые попытки трансплантации почек в экспериментах на собаках и козах были проведены в начале XX века [83]. На сегодняшний день модели на свиньях стали «золотым стандартом» благодаря схожести размера и анатомии почек, а также возможности выполнения сложных сосудистых анастомозов [25, 26]. Еще одним преимуществом моделей, воспроизводимых на этих млекопитающих, является сходная с человеческой структура комплекса МНС. Это особенно важно при проведении трансплантации органов.

Использование свиней с генетическими модификациями (нокаут генов ксеногенных антигенов, таких как *α -Gal*) позволило моделировать ксенотрансплантацию и отрабатывать стратегии преодоления сверхострого отторжения [25, 27]. Ортотопическая трансплантация почки у свиней с применением гипотермической машинной перфузии (ГМП) с добавлением мелатонина продемонстрировала снижение реперфузионного повреждения на 40%, что подтверждает потенциал фармакологического сопровождения консервации органов [28].

Свиньи также были использованы для создания специального устройства для элиминации вторичной тепловой ишемии, которое позволяет оптимально охлаждать трансплантат в течение всей имплантации [84]. В клинической практике данный способ профилактики ишемии позволит безопасно и эффективно снизить частоту отсроченной функции трансплантата – одного из самых частых послеоперационных осложнений.

Модели в урологической имплантологии и реконструктивной хирургии

Модели на мелких животных (крысах, мышах, кроликах) широко используются для изучения хирургических техник, заживления ран, оценки эффек-

тивности новых хирургических инструментов или процедур. Модели на животных сыграли решающую роль в совершенствовании лапароскопических операций и малоинвазивных методик, предполагающих выполнение небольших разрезов для минимизации времени восстановления и снижения риска инфицирования.

Крупные животные (свиньи, собаки, овцы, приматы) предлагают значительные преимущества при изучении сложных хирургических процедур благодаря своему анатомическому и физиологическому сходству с людьми, их размер позволяет использовать те же хирургические инструменты и методы, что и у людей, тем самым повышая актуальность результатов. Крупные животные часто используются в доклинических испытаниях новых технологий в трансплантологии, сосудистой хирургии, ортопедии.

Прежде чем любой новый имплантат может быть внедрен в клиническую практику человека, он должен пройти тестирование для обеспечения его безопасности, эффективности и биосовместимости. Животные модели предоставляют важные средства оценки того, как имплантаты функционируют в живом организме, позволяя изучать взаимодействие между организмом и инородными материалами, наблюдать, как иммунная система реагирует на имплантат, интегрируется ли ткань с материалом и возникают ли какие-либо долгосрочные осложнения [81]. Эти модели позволяют оценить долговечность и функциональность имплантатов в условиях, которые максимально имитируют биологию человека.

Моделирование на животных имеет решающее значение для оценки новых методов лечения. Так, например, изучение костных инфекций и остеомиелита осуществляют на овцах благодаря схожести костной структуры этих животных и человека. Использование этих животных позволяет оценить функциональную эффективность методов коррекции пролапса тазовых органов [17, 29].

Козы в качестве модельных животных используются для разработки способа лечения больших дефектов мочеочника (реконструкции), когда традиционные хирургические методы не могут быть использованы, а донорские ткани недоступны [82].

Конечно, эталонной моделью во многих биомедицинских исследованиях являются нечеловекообразные приматы, но их применение ограничено [17].

Технологические инновации в урологической хирургии и трансплантологии

Следующим закономерным этапом эволюции хирургических моделей *in vivo* стала их технологическая трансформация. Если ранее эволюция касалась в основном выбора вида животного, то современный

этап характеризуется высокотехнологичными системами, которые трансформируют саму суть хирургического вмешательства. Роботические ассистивные системы и алгоритмы искусственного интеллекта перестали быть просто инструментами; они стали неотъемлемыми компонентами новой гибридной хирургической модели, где действия хирурга усиливаются и дополняются машиной. Это знаменует переход от биологической эволюции моделей к их кибернетической эволюции, что кардинально повышает точность, воспроизводимость и прогнозируемость результатов.

Интеграция роботизированных систем, таких как *da Vinci*, *Senhance* и *Versius*, произвела революцию в минимально инвазивной урологической хирургии [19, 33–35]. Роботизированная трансплантация почки (*RAKT*) демонстрирует значительные преимущества по сравнению с открытым доступом: снижение интраоперационной кровопотери, уменьшение длины разреза, меньшая частота раневых инфекций и лимфоцеле [21, 36, 37]. Технологической основой являются роботизированные манипуляторы, обеспечивающие точность движений [36, 38], телеоперация «ведущий–ведомый» [39, 40], 3D-визуализация высокого разрешения [40] и тактильная обратная связь [39]. Благодаря передовым хирургическим методам хирургии получают полный контроль над сложными операциями, эффективно воздействуя на анатомические области и сводя к минимуму человеческий фактор [33, 41, 42]. Влияние роботизированной хирургии распространилось даже на неотложные операции [43], а совершенствование технологий, включающее системы принятия решений на основе ИИ, приведет к тому, что роботизированная хирургия станет доминирующей [44–47].

В настоящее время применение ИИ охватывает все этапы оказания помощи пациентам в урологии и трансплантологии [18].

При удалении простаты (простатэктомия) системы, основанные на ИИ, помогают хирургу сохранить нервные структуры, ответственные за эректильную функцию, улучшая качество жизни пациентов после операции; при нефрэктомии с роботизированной поддержкой – иссекать опухоль, минимизируя повреждение здоровых тканей и снижая риск послеоперационных осложнений [85]. ИИ также применяют при проведении ретроградной интратанальной хирургии [86].

Системы компьютерной поддержки CAS (Computer Aided или Assisted Surgery – CAS-технологии) включают 3D-визуализацию, 3D-анатомическое моделирование и расширенный анализ, что позволяет до операции проанализировать структуру и кровоснабжение органа, разработать методики и программные средства по предоперационному и интра-

операционному планированию хирургического вмешательства [87].

С 2017 года наблюдается стремительное развитие приложений ИИ [18], которые позволяют оптимизировать подбор «донор–реципиент», а также листы ожидания в системах типа *UNOS (United Network for Organ Sharing)*: объединенная сеть по обмену органами [50]. Так, алгоритмы машинного обучения, в частности градиентный бустинг – *XGBoost (Extreme gradient boosting)*: экстремальный градиентный бустинг, демонстрируют точность до 99% в прогнозировании совместимости [48, 49].

ИИ активно используется в интраоперационной навигации и планировании. Предоперационное 3D-моделирование на основе компьютерной (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ), интегрируемое в роботизированные системы, позволяет точно планировать ход операции [51]. В настоящее время с использованием инструментов ИИ активно разрабатываются системы дополненной реальности для интраоперационной визуализации сосудов [21, 52].

Доказано, что алгоритмы глубокого обучения, такие как *DRSA-U-Net (Deformable Residual Spatial Attention U-Net)*: U-образная сеть с деформируемым остаточным слоем пространственного внимания, значительно повышают четкость МРТ-изображений для ранней диагностики осложнений, тем самым совершенствуя процессы послеоперационного мониторинга и ведения пациента [52]. Установлено, что системы телемедицинского мониторинга позволяют дистанционно контролировать уровень иммуносупрессантов; мобильные приложения помогают снизить колебания концентрации такролимуса [53, 54].

ИИ позволил расширить возможности в аспекте совершенствования точности при прогнозировании отдаленных исходов. В научной литературе имеются данные о том, что модели на основе ИИ, такие как *DISPO (DIScharge POtential)*: модель для прогнозирования потенциала выписки), превосходят традиционные методы в прогнозировании выживаемости трансплантата [55–57]. Исследования показывают, что в некоторых случаях системы ИИ могут превосходить врачей в прогнозировании долгосрочной несостоятельности трансплантата [58].

Благодаря использованию ИИ в трансплантологии появилась возможность прогнозирования отторжения пересаживаемого органа на генетическом уровне. В научной литературе упоминаются инструменты типа *KID9+3 (Kidney injury diagnosis 9+3)*: геномный классификатор для идентификации специфических молекулярных сигнатур, связанных с повреждением и отторжением почки) и *PRESTO (Profile ranking expression signatures tool organization)*: вычислительный инструмент для анализа сигнатур экспрессии генов), которые позволяют идентифицировать молекулярные

Особый интерес для урологической исследовательской практики представляют 3D-биомиметические системы, такие как костные эксплантаты *ex vivo*. Они сохраняют нативную клеточную среду и трехмерную архитектуру, что позволяет в режиме реального времени изучать ключевые процессы: остеоинтеграцию, миграцию иммунных клеток и взаимодействие остеоцитов – явления, которые невозможно воспроизвести в традиционных 2D-культурах [70, 71]. Хотя прямое применение таких моделей в урологии ограничено, принцип сохранения сложной тканевой архитектуры является крайне важным для разработки, например, биоискусственных мочевого пузыря или тестирования имплантатов для реконструктивной урологии.

Учитывая вышеизложенное, становится очевидным, что современные стратегии эксплантации, включающие перфузионные платформы, усовершенствованную криоконсервацию и сложные биомиметические модели, становятся мощным инструментом в доклинической урологии и трансплантологии. Они позволяют проводить высокоточные исследования на человеко-релевантных тканях, минимизируя использование лабораторных животных и ускоряя трансляцию инновационных методов в клиническую практику.

Междисциплинарные перспективы хирургии почки

Доклинические исследования в урологии вступили в эру междисциплинарной интеграции. Опыт других областей науки, таких как регенеративная медицина, где нейральные стволовые клетки рассматриваются как перспективный вариант лечения травмы спинного мозга благодаря свойству дифференцировки в нейроны и модуляции воспаления [72], или ортопедия, где 3D-костные эксплантаты *ex vivo* сохраняют среду для изучения остеоинтеграции [70, 71], демонстрируют универсальность многих технологических платформ. Адаптация этих подходов к задачам урологии, в том числе в области использования принципов регенеративной медицины для восстановления уротелия или применения 3D-моделей для изучения биосовместимости урологических имплантатов, является перспективным направлением. Анализ современной мировой литературы выявляет в последние 10 лет увеличение числа исследований, посвященных вопросам ксенотрансплантации (на 35%), машинной перфузии (на 28%) и доставки наночастиц (на 22%) [73]. Однако сохраняются проблемы: только 32% исследований подтверждают результаты более чем в двух доклинических моделях, что ограничивает надежность трансляции полученных результатов исследований в практику [74].

Опыт хирургических практик подтверждает важность адекватного выбора биологической модели. Так, в кардиохирургии использование генетически модифицированных свиней-доноров с редактированием провоспалительных генов и перфузией с мРНК позволило достичь 50% снижения отторжения сердечных ксенотрансплантатов у приматов [28, 30], что задает высокий стандарт для урологических исследований в области ксенотрансплантации почки [27, 31]. Аналогично успешное применение моделей на свиньях для васкуляризированной комбинированной аллотрансплантации (ВКА), где блокада костимуляции в сочетании с *Treg*-терапией продлевает жизнь трансплантата [26], демонстрирует перспективность комбинированных иммунологических подходов, актуальных и для урологии. Исследования в области трансплантации легких, где мультиорганные платформы *ex vivo* с машинной перфузией позволяют оценить функцию трансплантата и снизить уровень провоспалительных биомаркеров на 70% [32], указывают на потенциальные пути совершенствования методов консервации почечного трансплантата в урологической хирургической практике.

На основе анализа научных публикаций, безусловно, можно заключить, что перспективными направлениями медицины являются персонализированная медицина (внедрение мультиомных технологий для создания индивидуализированных схем); развитие биоинженерных подходов (создание биоискусственных органов); ксенотрансплантация (пересадка органов от одного биологического вида другому: трансплантация почки от генетически модифицированной свиньи человеку [31, 75]); стандартизация и валидация [73].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведение испытаний на лабораторных животных необходимо, особенно при выполнении хирургических операций, моделирование которых математически невозможно.

Проведенный анализ эволюции хирургических моделей *in vivo* в доклинической урологии демонстрирует четкую траекторию развития от фундаментальных анатомических исследований к сложным, технологически насыщенным и этически обоснованным системам. Ключевым вектором этой эволюции стал переход от простого анатомического подобия к достижению комплексной патофизиологической релевантности, что потребовало смены парадигмы в выборе биологических моделей – от доминирования грызунов к использованию крупных животных для отработки хирургической техники и оценки отдаленных последствий.

Современный этап характеризуется переходом от биологических к кибернетическим моделям. Роботизированные системы и искусственный интеллект

обеспечили беспрецедентную точность, минимальную инвазивность и возможности для прогнозирования исходов. Эксплантация (*ex vivo*) стала неотъемлемым элементом доклинических исследований, заполнив пробел между клеточными культурами и экспериментами на целых организмах. Перфузионные платформы, усовершенствованная криоконсервация и 3D-биомиметические системы позволяют проводить высокоточные исследования на человеко-релевантном материале, минимизируя использование лабораторных животных в соответствии с принципом 3R и ускоряя трансляцию результатов в клинику.

Важнейшим трендом является междисциплинарная конвергенция. Опыт кардиохирургии, трансплантологии, ортопедии и регенеративной медицины предоставляет универсальные технологические платформы и протоколы, адаптация которых открывает новые возможности для урологии. Перспективы дальнейшего развития связаны с углублением персонализации (применение мультимедийных технологий и ИИ), развитием биоинженерии (создание биоискусственных органов), прогрессом в области ксенотрансплантации, и что крайне важно, со стандартизацией и валидацией доклинических моделей для повышения воспроизводимости и трансляционной ценности данных.

Таким образом, современная хирургическая модель *in vivo* в урологии представляет собой гибридную, многоуровневую систему, включающую роботизированные ассистивные технологии, алгоритмы искусственного интеллекта и методы работы *ex vivo*.

Несмотря на успехи в использовании ИИ имеется ряд факторов, сдерживающих его применение в хирургии. Это стандартизация исходных данных, учет атипичных случаев, риск смещения используемой выборки, прозрачность процесса принятия решений в моделях машинного обучения. По мере развития технологий модели, воспроизводимые на животных, вероятно, останутся неотъемлемой частью медицинских исследований, взаимодействуя с новыми технологическими достижениями и способствуя разработке новых инновационных методов лечения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Naam S, Noda K, Philips BJ, Harano T, Sanchez PG, Shigemura N. Cyclosporin A administration during *ex vivo* lung perfusion preserves lung grafts in rat transplant model. *Transplantation*. 2020; 104 (9): e252–e259. doi: 10.1097/TP.0000000000003237.
2. Woillard JB, Labriffe M, Debord J, Marquet P. Mycophenolic acid exposure prediction using machine learning. *Clin Pharmacol Ther*. 2021; 110 (2): 370–379. doi: 10.1002/cpt.2216.
3. Divard G, Raynaud M, Tatapudi VS, Abdalla B, Bailly E, Assayag M et al. Comparison of artificial intelligence and human-based prediction and stratification of the risk of long-term kidney allograft failure. *Commun Med (Lond)*. 2022; 2 (1): 150. doi: 10.1038/s43856-022-00201-9.
4. Li H, Han Z, Wu H, Musaev ER, Lin Y, Li S et al. Artificial intelligence in surgery: evolution, trends, and future directions. *Int J Surg*. 2025; 111 (2): 2101–2111. doi: 10.1097/JS9.0000000000002159.
5. Shan J. Surgical Robotics: Recent Development Trends and Challenges. In: 2025 IEEE International Conference on Robotics and Technologies for Industrial Automation (ROBOTHIA). 2025: 1–6. doi: 10.1109/ROBOTHIA63806.2025.10986348.
6. Cole BJ, Chahla JA, Chubinskaya SG, Gilat R, Frank RM, Yanke AB. Optimizing Patient Outcomes Following Osteochondral Allograft Transplantation: The Impact of 25 Years of Translational and Clinical Research. *J Orthop Res*. 2025; 43 (10): 1705–1723. doi: 10.1002/jor.26089.
7. Ali H, Shroff A, Soliman K, Molnar MZ, Sharif A, Burke B et al. Improved survival prediction for kidney transplant outcomes using artificial intelligence-based models: development of the UK Deceased Donor Kidney Transplant Outcome Prediction (UK-DTOP) Tool. *Ren Fail*. 2024; 46 (2): 2373273. doi: 10.1080/0886022X.2024.2373273.
8. Sundaram V, Infant SS, Saravanan A, Bhavani SB, Gulothungan G, Arora S, Chopra H. Innovative animal models for surgical interventions and implant biocompatibility: a translational perspective. *Ann Med Surg (Lond)*. 2025 Jul 18; 87 (10): 6496–6509. doi: 10.1097/MS9.0000000000003610.
9. Kovesdy CP. Epidemiology of chronic kidney disease: an update 2022. *Kidney Int Suppl*. 2022; 12 (1): 7–11. doi: 10.1016/j.kisu.2021.11.003.
10. Flythe JE, Watnick S. Dialysis for chronic kidney failure: a review. *JAMA*. 2024; 332 (18): 1559–1573. doi: 10.1001/jama.2024.16338.
11. Lewis A, Koukoura A, Tsianos GI, Gargavanis AA, Nielsen AA, Vassiliadis E. Organ donation in the US and Europe: the supply vs demand imbalance. *Transplant Rev (Orlando)*. 2021; 35 (2): 100585. doi: 10.1016/j.trre.2020.100585.
12. Meier RPH, Ben Nasr M, Fife BT, Finger EB, Fiorina P, Luo X, Bromberg JS. Best practices in islet transplantation in mice. *Am J Transplant*. 2025; 25 (7): 1399–1409. doi: 10.1016/j.ajt.2025.03.008.
13. Garcia Valencia OA, Thongprayoon C, Jadowiec CC, Mao SA, Leeaphorn N, Budhiraja P et al. Evaluating Global and Temporal Trends in Pancreas and Islet Cell Transplantation: Public Awareness and Engagement. *Clin Pract*. 2024; 14 (2): 590–601. doi: 10.3390/clinpract14020046.
14. Son J, Shin JY, Kim HD, Jung KH, Park KH, Park SJ. Development and validation of deep learning models for screening multiple abnormal findings in retinal fun-

- dus images. *Ophthalmology*. 2020; 127 (1): 85–94. doi: 10.1016/j.ophtha.2019.05.029.
15. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021; 372: n71. doi: 10.1136/bmj.n71.
 16. Ilevbare IM, Phaal R, Probert DR. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. *Technovation*. 2013; 33 (2–3): 30–37. doi: 10.1016/j.technovation.2012.11.003.
 17. Seifalian A, Digesu A, Khullar V. The use of animal models in preclinical investigations for the development of a surgical mesh for pelvic organ prolapse. *Int Urogynecol J*. 2024; 35 (4): 741–758. doi: 10.1007/s00192-024-05741-3.
 18. He YJ, Liu PL, Wei T, Liu T, Li YF, Yang J, Fan WX. Artificial intelligence in kidney transplantation: a 30-year bibliometric analysis of research trends, innovations, and future directions. *Ren Fail*. 2025; 47 (1): 2458754. doi: 10.1080/0886022X.2025.2458754.
 19. Rojas Burbano JC, Ruiz NI, Rojas Burbano GA, Guacho Inca JS, Arragan Lezama CA, González MS. Robot-Assisted Surgery: Current Applications and Future Trends in General Surgery. *Cureus*. 2025; 17 (4): e82318. doi: 10.7759/cureus.82318.
 20. Barandiaran Cornejo JF, Chin LT, Angelis M. From Carrel to Robotics: Renal Transplantation and the Evolution of its Surgical Technique. *Curr Urol Rep*. 2025; 26 (1). doi: 10.1007/s11934-025-01265-5.
 21. Zeuschner P, Friedersdorff F, Siemer S, Stöckle M. Aktuelles zur robotischen Nierentransplantation – quo vadis? *Urologie*. 2024; 63 (4): 361–366. doi: 10.1007/s00120-024-02293-8.
 22. Kalyan KS, Rajasekharan A, Sangeetha S. AMMU: a survey of transformer-based biomedical pretrained language models. *J Biomed Inform*. 2022; 126: 103982. doi: 10.1016/j.jbi.2021.103982.
 23. Dave T, Athaluri SA, Singh S. ChatGPT in medicine: an overview of its applications, advantages, limitations, future prospects, and ethical considerations. *Front Artif Intell*. 2023; 6: 1169595. doi: 10.3389/fraci.2023.1169595.
 24. Xie C, Piao M, Zhou L, Tao X, Yao Y, Jiang B et al. Emerging trends and hotspots in animal experimental research on lung transplantation from 2004 to 2023: a bibliometric analysis. *J Thorac Dis*. 2025; 17 (2): 796–815. doi: 10.21037/jtd-24-1451.
 25. Heinis FI, Merani S, Markin NW, Duncan KF, Moulton MJ, Fristoe L et al. Considerations for the use of porcine organ donation models in preclinical organ donor intervention research. *Anim Model Exp Med*. 2024; 7 (3): 283–296. doi: 10.1002/ame2.12411.
 26. Matar AJ, Crepeau RL, Mundinger GS, Cetrulo CL Jr, Torabi R. Large Animal Models of Vascularized Composite Allotransplantation: A Review of Immune Strategies to Improve Allograft Outcomes. *Front Immunol*. 2021; 12: 664577. doi: 10.3389/fimmu.2021.664577.
 27. Byrne GW, McGregor CGA. 2025: status of cardiac xenotransplantation including preclinical models. *Front Transplant*. 2025; 4: 1568910. doi: 10.3389/frtra.2025.1568910.
 28. Niroomand A, Nita GE, Lindstedt S. Machine Perfusion and Bioengineering Strategies in Transplantation. Beyond the Emerging Concepts. *Transpl Int*. 2024; 37: 13215. doi: 10.3389/ti.2024.13215.
 29. Beagan MLC, Dreyer CH, Jensen LK, Jensen HE, Andersen TE, Overgaard S, Ding M. The potential of sheep in preclinical models for bone infection research. A systematic review. *J Orthop Transl*. 2024; 45: 120–131. doi: 10.1016/j.jot.2024.02.002.
 30. Cutrone AM, Ozgur OS, Lyon A, Longchamp A, Madsen JC, Yeh H, Uygun K. Cryopreservation Strategies to Improve Access to Organ Transplantation. *Transplantation*. 2026 Jan 1; 110 (1): e42–e54. doi: 10.1097/TP.0000000000005494.
 31. Kawai T, Williams WW, Elias N, Fishman JA, Crisalli K, Longchamp A et al. Xenotransplantation of a Porcine Kidney for End-Stage Kidney Disease. *N Engl J Med*. 2025; 392 (19): 1933–1940. doi: 10.1056/NEJMoa2412747.
 32. Nykänen AI, Keshavjee S, Liu M. Creating superior lungs for transplantation with next-generation gene therapy during *ex vivo* lung perfusion. *J Heart Lung Transplant*. 2024; 43 (5): 838–848. doi: 10.1016/j.healun.2024.01.016.
 33. Biswas P, Sikander S, Kulkarni P. Recent advances in robot-assisted surgical systems. *Biomed Eng Adv*. 2023; 6: 100109. doi: 10.1016/j.bea.2023.100109.
 34. Intuitive Surgical. Da Vinci X: a foundational entry point to robotic surgery. 2025. <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/x>.
 35. Krebs TF, Kayser T, Lorenzen U, Grünewald M, Kayser M, Saltner A et al. Evaluation of the Versius robotic system for infant surgery – a study in piglets of less than 10 kg body weight. *Children (Basel)*. 2023; 10 (5): 831. doi: 10.3390/children10050831.
 36. Hancock KJ, Klimberg VS, Nunez-Lopez O, Gajjar AH, Gomez G, Tyler DS, Rashidi L. Optimizing outcomes in colorectal surgery: cost and clinical analysis of robotic versus laparoscopic approaches to colon resection. *J Robot Surg*. 2022; 16: 107–112. doi: 10.1007/s11701-021-01205-8.
 37. Reddy K, Gharde P, Tayade H, Patil M, Reddy LS, Surya D. Advancements in robotic surgery: a comprehensive overview of current utilizations and upcoming frontiers. *Cureus*. 2023; 15 (12): e50415. doi: 10.7759/cureus.50415.
 38. Sheetz KH, Clafflin J, Dimick JB. Trends in the adoption of robotic surgery for common surgical procedures. *JAMA Netw Open*. 2020; 3 (1): e1918911. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2019.18911.
 39. Liu Q, Zhang W, Zhao JJ, Syn NL, Cipriani F, Alzoubi M et al. Propensity-score matched and coarsened-exact matched analysis comparing robotic and laparoscopic major hepatectomies: an international multicenter study of 4822 cases. *Ann Surg*. 2023; 278: 969–975. doi: 10.1097/SLA.0000000000005855.
 40. Rivero-Moreno Y, Echevarria S, Vidal-Valderrama C, Pianetti L, Cordova-Guilarte J, Navarro-Gonzalez J et al. Robotic surgery: a comprehensive review of the

- literature and current trends. *Cureus*. 2023; 15 (7): e42370. doi: 10.7759/cureus.42370.
41. *Cepolina F, Razzoli RP*. An introductory review of robotically assisted surgical systems. *Int J Med Robot*. 2022; 18 (4): e2409. doi: 10.1002/rcs.2409.
 42. *AlSajri AA, Hariry N*. The future of surgery: robotic-assisted procedures and their impact. *SHIFAA*. 2024; 2024: 52–55.
 43. *Lunardi N, Abou-Zamzam A, Florecki KL, Chidambaram S, Shih IF, Kent AJ et al*. Robotic technology in emergency general surgery cases in the era of minimally invasive surgery. *JAMA Surg*. 2024; 159 (5): 493–499. doi: 10.1001/jamasurg.2024.0016.
 44. *Perry R, Barbosa JP, Perry I, Barbosa J*. Short-term outcomes of robot-assisted versus conventional minimally invasive esophagectomy for esophageal cancer: a systematic review and meta-analysis of 18,187 patients. *J Robot Surg*. 2024; 18: 123. doi: 10.1007/s11701-024-01880-3.
 45. *Picozzi P, Nocco U, Labate C, Gambini I, Puleo G, Silvi F et al*. Advances in robotic surgery: a review of new surgical platforms. *Electronics*. 2024; 13 (23): 4675. doi: 10.3390/electronics13234675.
 46. *Bobade S, Asutkar S*. Current trends and future directions in surgery: a brief scoping review. *Multidiscip Rev*. 2025; 8: 2025028. doi: 10.31893/multirev.2025028.
 47. *Wehrle CJ, Chang JH, Gross AR, Woo K, Naples R, Stackhouse KA et al*. Comparing oncologic and surgical outcomes of robotic and laparoscopic pancreatoduodenectomy in patients with pancreatic cancer: a propensity-matched analysis. *Surg Endosc*. 2024; 38 (5): 2602–2610. doi: 10.1007/s00464-024-10783-1.
 48. *Paquette FX, Ghassemi A, Bukhtiyarova O, Cisse M, Gagnon N, Della Vecchia A et al*. Machine learning support for decision-making in kidney transplantation: step-by-step development of a technological solution. *JMIR Med Inform*. 2022; 10 (6): e34554. doi: 10.2196/34554.
 49. *Alowidi N, Ali R, Sadaqah M, Naemi FMA*. Advancing kidney transplantation: a machine learning approach to enhance donor-recipient matching. *Diagnostics (Basel)*. 2024; 14 (19): 2119. doi: 10.3390/diagnostics14192119.
 50. *Zingraf G, Derkowski DM, Pizarro YI, Woodard A*. U.S. Organ Transplantation System – its history, present, and future. *Nephrol Nurs J*. 2023; 50 (3): 197–202. doi: 10.37526/1526-744X.2023.50.3.197.
 51. *Dagnino G, Kundrat D*. Robot-assistive minimally invasive surgery: trends and future directions. *Int J Intell Robot Appl*. 2024; 8: 812–826. doi: 10.1007/s41315-024-00340-3.
 52. *Liu H, Ren L, Fan B, Wang W, Hu X, Zhang X*. Artificial intelligence algorithm-based MRI in the diagnosis of complications after renal transplantation. *Contrast Media Mol Imaging*. 2022; 2022: 8930584. doi: 10.1155/2022/8930584.
 53. *Mata-Lima A, Paquete AR, Serrano-Olmedo JJ*. Remote patient monitoring and management in nephrology: a systematic review. *Nefrologia*. 2024; 44 (5): 639–667. doi: 10.1016/j.nefro.2024.10.011.
 54. *Yeter HH, Manani SM, Ronco C*. The utility of remote patient management in peritoneal dialysis. *Clin Kidney J*. 2021; 14 (12): 2483–2489. doi: 10.1093/ckj/sfab111.
 55. *Raynaud M, Aubert O, Divard G, Reese PP, Kamar N, Yoo D et al*. Dynamic prediction of renal survival among deeply phenotyped kidney transplant recipients using artificial intelligence: an observational, international, multicohort study. *Lancet Digit Health*. 2021; 3 (12): e795–e805. doi: 10.1016/S2589-7500(21)00209-0.
 56. *Thongprayoon C, Miao J, Jadlowiec C, Mao SA, Mao M, Leeaphorn N et al*. Distinct clinical profiles and post-transplant outcomes among kidney transplant recipients with lower education levels: uncovering patterns through machine learning clustering. *Ren Fail*. 2023; 45 (2): 2292163. doi: 10.1080/0886022X.2023.2292163.
 57. *Badrouchi S, Bacha MM, Ahmed A, Ben Abdallah T, Abderrahim E*. Predicting long-term outcomes of kidney transplantation in the era of artificial intelligence. *Sci Rep*. 2023; 13 (1): 21273. doi: 10.1038/s41598-023-48645-w.
 58. *Garcia Valencia OA, Thongprayoon C, Miao J, Bruminhent J, Craici IM, Cheungpasitporn W*. Perspectives on AI-based recommendations for mask-wearing and COVID-19 vaccination for transplant recipients in the post-COVID-19 era. *Ren Fail*. 2024; 46 (1): 2337291. doi: 10.1080/0886022X.2024.2337291.
 59. *Fu Q, Agarwal D, Deng K, Matheson R, Yang H, Wei L et al*. An unbiased machine learning exploration reveals gene sets predictive of allograft tolerance after kidney transplantation. *Front Immunol*. 2021; 12: 695806. doi: 10.3389/fimmu.2021.695806.
 60. *Halloran PF, Reeve J, Madill-Thomsen KS, Demko Z, Prewett A, Billings P*. The Trifecta Study: comparing plasma levels of donor-derived cell-free DNA with the molecular phenotype of kidney transplant biopsies. *J Am Soc Nephrol*. 2022; 33 (2): 387–400. doi: 10.1681/ASN.2021091191.
 61. *Li Y, Zhang J, Qiu X, Zhang Y, Wu J, Bi Q et al*. Diverse regulated cell death patterns and immune traits in kidney allograft with fibrosis: a prediction of renal allograft failure based on machine learning, single-nucleus RNA sequencing and molecular docking. *Ren Fail*. 2024; 46 (2): 2435487. doi: 10.1080/0886022X.2024.2435487.
 62. *Buscher K, Heitplatz B, van Marck V, Song J, Loismann S, Rixen R et al*. Data-driven kidney transplant phenotyping as a histology-independent framework for biomarker discovery. *J Am Soc Nephrol*. 2021; 32 (8): 1933–1945. doi: 10.1681/ASN.2020121685.
 63. *Yang S, Hou W, Liu L*. Progress in preservation of intestinal grafts by oxygenated hypothermic machine perfusion. *Transplant Rev*. 2024; 38 (1): 100802. doi: 10.1016/j.tre.2023.100802.
 64. *Srivastava PK, Kittleson MM*. Modern advances in heart transplantation. *Prog Cardiovasc Dis*. 2024; 82: 147–156. doi: 10.1016/j.pcad.2024.01.012.
 65. *Cheng H, Cui Z, Guo S, Zhang X, Huo Y, Mao S*. Mucocohesive versus mucopenetrating nanoparticles for oral delivery of insulin. *Acta Biomater*. 2021; 135: 506–519. doi: 10.1016/j.actbio.2021.08.046.
 66. *Alexander S, Moghadam MG, Rothenbroker M, Chou LYT*. Addressing the *in vivo* delivery of nucleic-acid nanostructure therapeutics. *Adv Drug Deliv Rev*. 2023; 199: 114898. doi: 10.1016/j.addr.2023.114898.

67. Coutance G, Chong AS, Habal MV. Novel pretransplant desensitization strategies in heart transplantation. *JHLT Open*. 2025; 8: 100242. doi: 10.1016/j.jhlto.2025.100242.
68. Marfil-Garza BA, Hefler J, Bermudez De Leon M, Pawlick R, Dadheech N, Shapiro AMJ. Progress in Translational Regulatory T Cell Therapies for Type 1 Diabetes and Islet Transplantation. *Endocr Rev*. 2021; 42 (2): 198–218. doi: 10.1210/endrev/bnaa028.
69. Tian Q, Wu C, Xu Y, Zhao Y. Experimental research progress on immunology of organ transplantation in 2020. *Organ Transplant*. 2021; 12 (2): 143–154. doi: 10.3969/j.issn.1674-7445.2021.02.004.
70. Cramer EEA, Ito K, Hofmann S. Ex vivo Bone Models and Their Potential in Preclinical Evaluation. *Curr Osteoporos Rep*. 2021; 19 (1): 75–87. doi: 10.1007/s11914-020-00649-5.
71. Ravi K, Manoharan TJM, Wang KC, Pockaj B, Nikkhah M. Engineered 3D ex vivo models to recapitulate the complex stromal and immune interactions within the tumor microenvironment. *Biomaterials*. 2024; 305: 122428. doi: 10.1016/j.biomaterials.2023.122428.
72. Guo W, Zhang X, Zhai J, Xue J. The roles and applications of neural stem cells in spinal cord injury repair. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022; 10: 966866. doi: 10.3389/fbioe.2022.966866.
73. Faria I, Canizares S, Viana P, Kueht M. II. Navigating the changing landscape of transplant research: Trends, topics, and gender disparities. *Am J Surg*. 2025; 239: 116003. doi: 10.1016/j.amjsurg.2024.116003.
74. Carneiro CFD, Drude N, Hülsemann M, Collazo A, Toelch U. Mapping strategies towards improved external validity in preclinical translational research. *Expert Opin Drug Discov*. 2023; 18 (11): 1273–1285. doi: 10.1080/17460441.2023.2251886.
75. Zgoura P, Seibert FS, Waldecker C, Doevelaar A, Bauer F, Rohn B et al. Psychological Responses to the Coronavirus Disease 2019 Pandemic in Renal Transplant Recipients. *Transplant Proc*. 2020; 52 (9): 2671–2675. doi: 10.1016/j.transproceed.2020.08.043.
76. Martins PNA. Kidney Transplantation in the rat: A modified technique using hydrodissection. *Microsurgery*. 2006; 26: 543–546.
77. Ahmadi AR, Qi L, Iwasaki K, Wang W, Wesson RN, Cameron AM, Sun Z. Orthotopic Rat Kidney Transplantation: A Novel and Simplified Surgical Approach. *J Vis Exp*. 2019 May 7; (147): e59403. doi: 10.3791/59403.
78. Gueler F, Shushakova N, Mengel M, Hueper K, Chen R, Liu X et al. A Novel Therapy to Attenuate Acute Kidney Injury and Ischemic Allograft Damage after Allogeneic Kidney Transplantation in Mice. *PLoS One*. 2015; 10 (1): e0115709. doi: 10.1371/journal.pone.0115709.
79. Mirioglu S, Morelle J, Efe O. Thrombotic microangiopathy after kidney transplantation: diagnosis and management strategies. *Clin Kidney J*. 2026 Jan 24; 19 (3): sfag018. doi: 10.1093/ckj/sfag018.
80. Zhao D, Liao T, Li S, Zhang Y, Zheng H, Zhou J et al. Mouse Model Established by Early Renal Transplantation After Skin Allograft Sensitization Mimics Clinical Antibody-Mediated Rejection. *Front Immunol*. 2018; 9: 1356. doi: 10.3389/fimmu.2018.01356.
81. Al-Shalawi FD, Mohamed Ariff AH, Jung DW, Mohd Ariffin MKA, Seng Kim CL, Brabazon D, Al-Osaimi MO. Biomaterials as implants in the orthopedic field for regenerative medicine: metal versus synthetic polymers. *Polymers (Basel)*. 2023; 15 (12): 2601. doi: 10.3390/polym15122601.
82. Versteegden LRM, de Jonge PKJD, IntHout J, van Kuppevelt TH, Oosterwijk E, Feitz WFJ et al. Tissue engineering of the urethra: a systematic review and meta-analysis of preclinical and clinical studies. *Eur Urol*. 2017; 72 (4): 594–606. doi: 10.1016/j.eururo.2017.03.026.
83. Кабанова СА, Богопольский ПМ. Пересадка почки: история, итоги и перспективы (к 50-летию первой успешной пересадки почки в России). *Трансплантология*. 2015; (2): 49–58. Kabanova SA, Bogopol'skiy PM. Kidney transplant: history, results and perspectives (The 50th anniversary of the first successful kidney transplant in Russia). *Transplantologiya. The Russian Journal of Transplantation*. 2015; (2): 49–58. <https://doi.org/10.23873/2074-0506-2015-0-2-104>.
84. Шабунин АВ, Дроздов ПА, Makeev ДА, Нестеренко ИВ, Журавель ОС, Астапович СА, Лиджиева ЭА. Влияние элиминации вторичной тепловой ишемии на функцию почечного трансплантата: эксперимент и клиническое исследование. *Вестник трансплантологии и искусственных органов*. 2023; 25 (2): 26–37. Shabunin AV, Drozdov PA, Makeev DA, Nesterenko IV, Zhuravel OS, Astapovich SA, Lidjjeva EA. Effect of second warm ischemia elimination on kidney graft function: an experiment and clinical study. *Russian Journal of Transplantation and Artificial Organs*. 2023; 25 (2): 26–37. doi: 10.15825/1995-1191-2023-2-26-37.
85. Гусев АА. Какие нейросети и как может использовать врач-уролог в своей ежедневной работе: практические рекомендации. *Вестник урологии*. 2025; 13 (1): 99–109. Gusev AA. What neural networks and how a urologist can utilize in his routine tasks: practical tips. *Urology Herald*. 2025; 13 (1): 99–109. (In Russ.). doi: 10.21886/2308-6424-2025-13-1-99-109.
86. Шамхалова КК, Меринов ДС, Артемов АВ, Гурбанов ШШ. Искусственный интеллект и нейронные сети в урологии. *Экспериментальная и клиническая урология*. 2023; 16 (2): 32–37. Shamkhalova KK, Merinov DS, Artemov AV, Gurbanov ShSh. Artificial intelligence and neural networks in urology. *Experimental and Clinical Urology*. 2023; 16 (2): 32–37. <https://doi.org/10.29188/2222-8543-2023-16-2-32-37>.
87. Кобринский БА. Системы искусственного интеллекта в хирургии: возможности, ограничения и перспективы. Обзор литературы. *Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии*. 2023; 13 (3): 385–404. Kobrinskii BA. Artificial intelligence systems in surgery: A review of opportunities, limitations, and prospects. Review. *Russian Journal of Pediatric Surgery, Anesthesia and Intensive Care*. 2023; 13 (3): 385–404. <https://doi.org/10.17816/psaic1547>.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025 г.
The article was submitted to the journal on 29.10.2025