



Применение инструментов на основе искусственного интеллекта в экспериментальной и трансляционной кардиологии: обзор

Степанов А. Д., Богданов Л. А., Шишкова Д. К., Кутихин А. Г.

Обзор литературы посвящен систематизации и критическому анализу инструментов искусственного интеллекта (ИИ), применяемых в экспериментальной и трансляционной кардиологии, оценке перспектив их практического использования и соответствующим ограничениям. На текущем этапе ИИ-инструменты наиболее активно применяются с целью автоматизации поиска, систематизации и анализа научной информации, а также выполнения математических расчетов на этапе планирования экспериментальной работы. Выполняемые исследования по разработке ИИ-алгоритмов для автоматизированного анализа массивов текстовых и графических данных на основе машинного обучения направлены на уменьшение времени проведения доклинических исследований для ускорения трансляции кардиопротективных, антиатеросклеротических, эндотелиопротективных и антикальцификационных фармакологических вмешательств в клиническую практику. В частности, ИИ-алгоритмы способны автоматически идентифицировать морфологические структуры и проводить их морфометрическую оценку при анализе биологических тканей и клеточных культур. ИИ-инструменты обладают высоким потенциалом для выявления скрытых и сложных закономерностей в табличных данных омиксных исследований, что позволяет выявлять межмолекулярные взаимодействия и объективно реконструировать развитие типовых патологических процессов. Активное использование ИИ-генераторов кода для создания специализированных программ ЭВМ устраняет необходимость междисциплинарного взаимодействия при автоматизации обработки экспериментальных данных.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, нейронные сети, экспериментальная кардиология, трансляционная медицина, программное обеспечение.

Отношения и деятельность. Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН в рамках фундаментальной темы НИИ КПССЗ № 0419-2024-0001 "Разработка новых фармакологических подходов к экспериментальной терапии атеросклероза, технологий серийного производства реактивов и расходных материалов для изучения физиологии и патофизиологии сердечно-сосудистой системы и программного обеспечения на основе искусственного интеллекта для автоматизированной диагностики патологий системы кровообращения и автоматизированного расчета сердечно-сосудистого риска" при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках национального проекта "Наука и университеты", <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/5O90V6DKTDEZ3L37R544GP18>.

ФГБНУ Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, Кемерово, Россия.

Степанов А. Д. — м.н.с. лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой медицины отдела экспериментальной медицины, ORCID: 0009-0009-7947-5917, Богданов Л. А. — к.б.н., н.с. лаборатории молекулярной, трансляционной и цифровой медицины отдела экспериментальной медицины, ORCID: 0000-0003-4124-2316, Шишкова Д. К. — к.б.н., зав. лабораторией молекулярной, трансляционной и цифровой медицины отдела экспериментальной медицины, ORCID: 0000-0002-1518-3888, Кутихин А. Г.* — д.м.н., зав. отделом экспериментальной медицины, ORCID: 0000-0001-8679-4857.

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author): antonkutikhin@gmail.com

ИИ — искусственный интеллект, ЭВМ — электронная вычислительная машина.

Рукопись получена 10.03.2026

Рецензия получена 20.03.2026

Принята к публикации 24.03.2026



Для цитирования: Степанов А. Д., Богданов Л. А., Шишкова Д. К., Кутихин А. Г. Применение инструментов на основе искусственного интеллекта в экспериментальной и трансляционной кардиологии: обзор. *Российский кардиологический журнал*. 2026;31(2S):6901. doi: 10.15829/1560-4071-2026-6901. EDN: LVXNQQ

Application of artificial intelligence-based tools in experimental and translational cardiology: a review

Stepanov A. D., Bogdanov L. A., Shishkova D. K., Kutikhin A. G.

This literature review systematizes and critically analyzes artificial intelligence (AI) tools used in experimental and translational cardiology, assessing the prospects for their practical use and the corresponding limitations. Currently, AI tools are most actively used to automate the search, systematization, and analysis of information, as well as to perform mathematical calculations during the experimental planning stage. Research on AI algorithms for automated analysis of text and graphical datasets based on machine learning is aimed at reducing the time required for preclinical studies to accelerate the translation of cardioprotective, anti-atherosclerotic, endothelial-protective, and anti-calcification pharmacological interventions into clinical practice. In particular, AI algorithms are capable of automatically identifying morphological structures and performing their morphometric assessment during the analysis of biological tissues and cell cultures. AI tools have high potential for revealing hidden and complex patterns in tabular data from omics studies, enabling the identification of intermolecular interactions and the objective reconstruction of the development of typical pathological processes. The active use of AI code generators to create specialized computer programs eliminates the need for interdisciplinary collaboration in the automation of experimental data processing.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, neural networks, experimental cardiology, translational medicine, software.

Relationships and Activities. This work was supported by the comprehensive program of fundamental research of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences within fundamental topic of the Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases № 0419-2024-0001 "Development of novel pharmacological approaches to experimental therapy of atherosclerosis, technologies for the mass production of reagents and consumables for studying the physiology and pathophysiology of the cardiovascular system and artificial intelligence software for automated diagnosis of cardiovascular pathologies and automated calculation of cardiovascular risk" with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the national project "Science and Universities", <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/5O90V6DKTDEZ3L37R544GP18>.

Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases, Kemerovo, Russia.

Stepanov A. D. ORCID: 0009-0009-7947-5917, Bogdanov L. A. ORCID: 0000-0003-4124-2316, Shishkova D. K. ORCID: 0000-0002-1518-3888, Kutikhin A. G.* ORCID: 0000-0001-8679-4857.

*Corresponding author:
antonkutikhin@gmail.com

Received: 10.03.2026 Revision Received: 20.03.2026 Accepted: 24.03.2026

For citation: Stepanov A. D., Bogdanov L. A., Shishkova D. K., Kutikhin A. G. Application of artificial intelligence-based tools in experimental and translational cardiology: a review. *Russian Journal of Cardiology*. 2026;31(2S):6901. doi: 10.15829/1560-4071-2026-6901. EDN: LVXNQQ

Ключевые моменты

- Инструменты искусственного интеллекта (ИИ) уже на текущем этапе своего развития существенно ускоряют поиск, систематизацию и анализ научной информации при планировании экспериментов, а также автоматизируют выполнение математических расчетов, необходимых для решения конкретных исследовательских задач.
- Разработка ИИ-инструментов для автоматизированного анализа массивов текстовых и графических данных на основе машинного обучения способна существенно уменьшить время проведения доклинических исследований при обработке полученных данных и ускорить трансляцию кардиопротективных, антиатеросклеротических, эндотелиопротективных и антикальцификационных фармакологических вмешательств в клиническую практику.
- Внедрение ИИ-генераторов кода для создания специализированных программ ЭВМ устраняет необходимость междисциплинарного взаимодействия при автоматизации обработки данных в фундаментальной кардиологии и предоставляет соответствующие технические возможности для соответствующих лабораторий.

В последние годы искусственный интеллект (ИИ) перестал восприниматься исключительно как технологическая инновация и стал повседневным инструментом научной и клинической деятельности [1-6]. Широкое распространение инструментов на основе ИИ обусловлено совокупностью нескольких принципиальных факторов: (1) экспоненциальным ростом объема пригодных к анализу биомедицинских данных вследствие смены технологического уклада и масштабной цифровизации [1]; (2) непосредственно связанным с этим повышением вычислительной мощности облачных ресурсов [1]; (3) активным развитием алгоритмов машинного обучения [1]; (4) возможностью самостоятельной разработки программного обеспечения под нужды конкретного пользователя [7, 8]; (5) интеграцией цифровых платформ в рутинную клиническую практику [4]. В результате ИИ-инструменты все чаще используются специалистами в области трансляционной медицины для:

Key messages

- Artificial intelligence (AI) tools, even at this stage of development, significantly accelerate the search, systematization, and analysis of evidence data during experimental design, and automate the mathematical calculations necessary to solve specific research problems.
- The development of AI tools for automated analysis of text and graphic data arrays based on machine learning has the potential to significantly reduce the time required for preclinical studies to process the obtained data and accelerate the translation of cardioprotective, anti-atherosclerotic, endothelial-protective, and anti-calcification pharmacological interventions into clinical practice.
- The implementation of AI code generators for creating specialized computer programs eliminates the need for interdisciplinary collaboration in the automation of data processing in fundamental cardiology and provides the necessary technical capabilities for relevant laboratories.

(1) автоматического поиска релевантной информации по исследуемым научным темам [2]; (2) алгоритмизации, автоматизации и ускорения анализа литературных данных, поиска молекулярных мишеней для экспериментальной фармакологии и разработки направленных фармакологических вмешательств [1, 9]; (3) выполнения математических и химических расчетов при проведении доклинических исследований на клеточных культурах и лабораторных животных [5]; (4) автоматизации и ускорения обработки больших массивов экспериментальных табличных (к примеру, результатов многопараметрического биохимического анализа) и графических данных (в частности, архивов цифровых гистологических препаратов) [4, 6, 10], в т.ч. путем создания узкоспециализированных программ для электронных вычислительных машин (ЭВМ) при помощи ИИ-генераторов программного кода [7, 8]. Использование ИИ снижает время- и трудозатраты исследователей, стандартизирует и структурирует поиск научно-медицинской информации, а также повышает качество ее анализа [1, 2, 11]. Скорость и объем внедрения ИИ в экспериментальную и трансляционную медицину, а также в повседневную деятельность сопоставима с таковой при

замене физических архивов цифровыми каталогами и при замене печатных справочных изданий индексирющими соответствующую информацию веб-поисковиками [12, 13]. Текущие тенденции развития и практика использования ИИ в трансляционной кардиологии модернизируют технологический процесс работы с научной информацией, оставляя за ИИ ее поиск и обработку, а за исследователями — ее валидацию, критический анализ и творческую интерпретацию [3, 4, 14]. Все вышеуказанное обуславливает необходимость анализа преимуществ и недостатков соответствующих ИИ-инструментов на современном этапе их развития.

Целью данного исследования была систематизация и критический анализ ИИ-инструментов, применяемых в экспериментальной и трансляционной кардиологии, оценка перспектив их практического использования и соответствующих ограничений.

Методология исследования

Настоящий обзор был подготовлен с использованием комбинированного подхода к поиску информации и ее верификации по библиографическим базам данных PubMed и elibrary.ru (Научная электронная библиотека). Поиск литературы осуществлялся с применением комбинаций ключевых слов и логических операторов. Поисковые запросы включали различные комбинации словосочетаний "artificial intelligence", "machine learning", "deep learning", "neural network", "neural networks", "cardiology", "cardiovascular disease", "cardiovascular research", "basic research", "translational research", "translational medicine", "bench to bedside", "natural language processing", "literature search", "information retrieval", "knowledge discovery", "text mining", "semantic analysis", "medical literature", "publications", "research articles", "evidence synthesis", "automated review", "knowledge extraction", "bibliometric analysis", "bibliometric clustering", "keyword mining", "large language models", "ChatGPT", "generative artificial intelligence", "experimental design", "image analysis", "digital pathology", "animal model", "in vivo", "hyperlipidemic", "atherosclerosis", "atherosclerotic", "plaque", "calcification", "mouse", "mice", "murine", "rat", "rats", "rabbit", "leporine", "swine", "porcine", "sheep", "ovine", "cell culture", "endothelial", "smooth muscle", "adventitial", "epicardial", "perivascular", "cardiac", "cardiomyocyte", "heart valve", "valvular", "in vitro", "drug discovery", "molecular docking", "drug dosing", "dose selection", "dose optimization", "dose prediction", "dose-response", "toxicity prediction", "pharmacology", "pharmacodynamics", "pharmacokinetics", "biomarkers", "biomarker discovery", "high-throughput screening", "genomic", "RNA-seq", "transcriptomic", "omics", "proteomics", "proteomic", "metabolomic", "molecular mechanisms", "molecular pathways", "gene-gene interactions", "vibe coding" и "software development". С учетом чрезвычайно высокой скорости раз-

вития тематики в анализ были включены систематические обзоры исключительно за 2025г в количестве 84 публикаций, из которых для представления результатов было отобрано 43 наиболее полно представляющих картину. Критериями включения в данный критический обзор (отражаемыми фильтрами при поиске) было обязательное описание ≥ 2 ИИ-инструментов и принадлежность к "Systematic Review" по типу исследования при индексации базой данных PubMed. Дополнительно на этапе первичного отбора источников применялись инструменты на основе нейросетевых языковых моделей для унификации терминологии и систематизации поисковых стратегий: YandexGPT (ООО "Яндекс", Россия), GigaChat с модулем AI for Science (ПАО Сбербанк, Россия) и ChatGPT (версия 5.2, OpenAI, США). При применении ИИ-инструментов достоверность всех источников была подтверждена вручную.

Результаты

Поиск и обработка научной информации

Использование библиометрических алгоритмов, основанных на анализе цитирования и совместной встречаемости ключевых слов, активно применяется для определения наиболее интенсивно изучаемых научных направлений и прогнозирования динамики их развития [2, 15, 16]. Специализированные программные продукты (VOSviewer, CiteSpace, Bibliometrix) для интеллектуального анализа текстов (text mining) позволяют извлекать ключевые концепции, устанавливать тематические связи между работами, формировать иерархию цитирования и тематические кластеры публикаций, а также выполнять подготовку соответствующих дайджестов для минимизации собственно поисковой части работы с научной литературой и максимально быстрого перехода к ее критическому анализу [1, 15, 16]. В одном исследовании такие алгоритмы применялись для анализа 260 клинических рекомендаций международных и национальных кардиологических обществ, что позволило выявить структуру и частоту использования различных принципов пациент-ориентированной помощи [17]. Отдельным преимуществом такого подхода является возможность преодоления ограничений доступности информации, причем речь идет не только об обходе барьеров платных подписок: в частности, рецензентам издательства AAAS (American Association for the Advancement of Science) запрещается использовать генеративный ИИ для подготовки рецензий, поскольку загрузка даже того или иного сегмента статьи в чат-бот допускает техническую возможность его последующего использования для обучения большой языковой модели. Практическим примером применения использования ИИ-инструментов для интеллектуального анализа текстов в трансляционной медицине является выявление рекомендуемых и максимально

безопасных дозровок тех или иных лекарственных препаратов или биоактивных веществ при их применении у человека на основании опубликованных исследований [18-21]. Данная процедура в обязательном порядке предшествует расчету эквивалентной дозы (animal equivalent dose) для тестирования кардиопротективных, антиатеросклеротических, антикальцификационных и эндотелиопротективных эффектов в доклинических испытаниях, позволяющих осуществлять объективную гистологическую оценку состояния элементов системы кровообращения [19, 22].

В то же время применение ИИ для поиска и анализа научной информации имеет ряд ограничений. Алгоритмы машинного обучения чувствительны к неполноте и неоднородности обучающих данных, что может приводить к непреднамеренному искажению результатов анализа [1, 14]. Большие языковые модели в большей степени оценивают количество, а не качество аргументов в пользу той или иной гипотезы, и при приблизительно равном количестве исследований с противоположными результатами генеративный ИИ на данный момент испытывает трудности с критическим анализом для выбора наиболее объективного из них, с равной частотой выбирая оба [21, 23]. Данная вариабельность при использовании генеративного ИИ для критического анализа неопределенных литературных данных характерна даже при параллельном использовании различных бесед внутри аккаунта одного и того же пользователя; кроме того, в таких случаях ИИ становится особенно чувствительным к формулировке текстового запроса [24]. Одной из наиболее частых претензий к ИИ-инструментам является то, что они функционируют как "черный ящик", выдавая заключения на основе скрытых алгоритмов (что технически действительно является верным) [1], однако на современном этапе их развития они способны к показательной деконструкции собственной логики с иллюстрацией алгоритмов своего мышления применительно к каждому из этапов анализа в соответствии с текстовым запросом пользователя [23]. Также отмечается, что большие языковые модели могут генерировать ссылки на несуществующие источники или исказить информацию о библиографических данных реальных источников, с чем в том или ином виде сталкивалось большинство пользователей генеративного ИИ [2, 11, 24, 25].

Сокращение стоимости и продолжительности доклинических испытаний

Одной из главных задач трансляционной медицины является ускорение проведения доклинических испытаний при сохранении объективности получаемых результатов. Направленные на решение этой задачи усилия позволяют уменьшить временные и финансовые затраты на проверку гипотез, выдвинутых на основе фундаментальных исследований. Это, в свою очередь, позволяет увеличить количество тестируе-

мых в процессе скрининга перспективных фармакологических вмешательств и количество используемых при этом экспериментальных моделей на основе лабораторных животных и клеточных культур. С учетом необходимости объективизации доклинических испытаний становится особенно важным устранение человеческого фактора при обработке графических и текстовых массивов экспериментальных данных, что достигается при замещении мануального анализа автоматизированным на основе ИИ-алгоритмов.

ИИ-системы способны автоматически сегментировать анатомические структуры, выявлять патологические изменения и проводить количественную морфометрическую оценку [4, 15, 23, 26]. Это определяет их значение не только для клинического применения (к примеру, для совершенствования систем навигации при транскатетерном биопротезировании клапанов сердца), но и для ускорения проведения доклинических испытаний на животных моделях [10, 26, 27]. Одной из задач доклинических исследований в современной кардиологии является оценка липидного и кальциевого поражения клапанов сердца гиперлипидемических мышей, а также формирования атеросклеротических бляшек в их артериях (в частности, в аорте) [28, 29]. В настоящее время полуколичественная оценка микроскопических изображений и морфометрический анализ сосудистой стенки проводятся с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом для мануальной разметки гистологических объектов на изображениях (к примеру, ImageJ, National Institutes of Health, США), на что уходит значимая часть времени доклинических испытаний [30, 31]. Предварительно обученные ИИ-системы для виртуального окрашивания и машинной разметки гистологических объектов при помощи компьютерного зрения призваны автоматизировать и оптимизировать этот процесс, однако на текущий момент они все еще находятся в процессе разработки и предварительной валидации [28, 32].

Не менее важной задачей при анализе состояния элементов системы кровообращения в доклинических исследованиях является автоматическая идентификация клеточных популяций в тканях стенок кровеносных сосудов, миокарда и клапанов сердца, в т.ч. для полуколичественной оценки лейкоцитарной инфильтрации при воспалительных процессах [10, 32]. Данные исследования проводятся на основе микропрепаратов тканей лабораторных животных, однако традиционное выполнение такого анализа также сопряжено с необходимостью сочетания нескольких видов гистохимического окрашивания [33]. В связи с этим в последние годы активно разрабатываются программные продукты на базе ИИ, которые могли бы оптимизировать и этот процесс, автоматически проводя идентификацию различных типов клеток и их количественную оценку на цифровых препара-

тах гистологических срезов [32, 34], при этом подобные технологии уже прошли валидацию и активно применяются в онкологии [10, 35]. Это указывает на принципиальную осуществимость такого решения и возможность его внедрения в текущую научно-исследовательскую практику и в экспериментальной и трансляционной кардиологии.

При исследовании кардиопротективных эффектов фармакологических вмешательств одной из обязательных задач является анализ электрокардиограммы для оценки функционального состояния сердца [27, 36, 37]. Клинический опыт показывает, что ИИ-инструменты для анализа электрокардиограмм пациентов позволяют с высокой точностью обнаруживать удлинение интервала QT и выявлять скрытые паттерны аритмий на основании тысяч неаннотированных записей [27]. Данная способность ИИ позволяет принципиально улучшить анализ электрокардиограммы лабораторных животных, высокая и неконтролируемая физическая активность которых приводит к неустрашимым стохастическим помехам при записи электрокардиограммы [36]. Альтернативой является обеспечение неподвижности животных посредством ингаляционного наркоза, однако это само по себе влияет на функциональное состояние миокарда, что также неизбежно искажает объективность записи электрокардиограммы [36]. Следствием данных технических проблем является фактическое отсутствие общепринятых стандартов проведения и интерпретации электрокардиограммы у лабораторных мышей и крыс [36]. Разработка соответствующего ИИ-инструмента могла бы позволить автоматически выявлять и устранять артефакты при телеметрической электрокардиографии [37], что позволило бы установить нормальные параметры электрокардиограммы у мелких лабораторных животных и сопоставить их с аналогичными данными при введении их в наркоз с вероятной валидацией обеих методик.

Не менее актуальным направлением является разработка и применение ИИ-инструментов для анализа состояния культур различных клеток элементов системы кровообращения, в т.ч. эндотелиальных клеток, гладких миоцитов сосудов, фибробластов адвентиции, адипоцитов эпикардиальной и околососудистой жировой ткани, интерстициальных клеток клапанов сердца и кардиомиоцитов [38-40]. Предварительно обученные алгоритмы машинного обучения способны автоматически идентифицировать и классифицировать нормальные, дисфункциональные и стареющие эндотелиальные клетки, которые существенно отличаются по морфологическим признакам и вследствие этого могут быть размечены с высокой чувствительностью и специфичностью [39]. Работа над разработкой такого алгоритма в настоящее время ведется одним из отечественных научных коллективов. По аналогии с применением аналогичного алгоритма для опреде-

ления липидного и кальциевого поражения клапанов сердца, данный подход способен ускорить проведение доклинических испытаний фармакологических вмешательств и предшествующих им исследований в области патофизиологии эндотелия, направленных на разработку клинически релевантных моделей дисфункции эндотелия и на анализ закономерностей старения первичных эндотелиальных клеток различных направлений дифференцировки в культуре [38]. Ранее данный подход уже был успешно применен для анализа морфологических признаков и функциональных свойств кардиомиоцитов, включая организацию саркомеров, работу кальциевых каналов и сократительную активность [40]. ИИ-инструменты данной направленности могут быть особенно полезными в регенеративной медицине, сопоставляя морфологические паттерны выделенных из тканей человека первичных клеток (в т.ч. кардиомиоцитов) с выявляемыми при их искусственно запускаемой дифференцировке из плюрипотентных стволовых клеток, в т.ч. при воздействии различных видов экспериментальной терапии [41].

Параллельное развитие ИИ-технологий и экспресс-диагностики у постели больного при помощи иммунохроматографических тест-полосок привело к активным попыткам устранить одно из основных ограничений данной диагностической технологии — невозможность количественного анализа результата без использования специализированного считывающего устройства [42]. Ранее соответствующие смартфонные приложения на основе ИИ показали свою эффективность при иммунохроматографическом измерении концентрации тропонина I у пациентов с острым коронарным синдромом [43, 44]. Применение иммунохроматографических тест-полосок в сочетании со смартфонными ИИ-приложениями в отношении количественного анализа концентрации различных молекул в питательной среде от клеточных культур способно устранить артефакты преаналитического этапа исследования в экспериментальной практике, позволяя проводить соответствующие измерения непосредственно после отбора и предварительного центрифугирования культуральной среды без ее аликвотирования и заморозки [42]. Следует отметить, что подготовка стандартизированных массивов обучающих данных для разработки ИИ-инструментов подобного рода осложняется зависимостью получаемых изображений от цветового оттенка фона, интенсивности и характера освещения, разрешения цифровой камеры и прочих параметров фотосъемки, что в значительной степени индивидуализирует использование разработанного на их основе программного обеспечения [42].

Актуальным направлением разработки ИИ-алгоритмов является прогнозирование кардио- и цитотоксичности лекарственных препаратов или отдельных химических соединений. Так, для раннего выявления рисков блокады калиевых каналов или удлине-

ния интервала QT создаются специализированные базы данных, описывающие все изоформы и количественные характеристики структуры (молекулярные дескрипторы) соединений с уже известной активностью. При помощи этих баз данных происходит обучение соответствующих ИИ-моделей, способных в дальнейшем предсказывать химические свойства и классифицировать еще не изученные биоактивные вещества [27]. Способность ИИ-инструментов к автоматической идентификации связей между различными записями в каталогах позволяет использовать их для выявления неочевидных и/или сложных межмолекулярных взаимодействий между генами, белками или метаболитами при высокопроизводительных методах анализа — полнотранскриптомном секвенировании, эпигеномном анализе метилирования ДНК и модификаций гистонов, масс-спектрометрическом профилировании белков и метаболитов в лизатах клеточных культур, гомогенатах биологических тканей или биологических жидкостях (в т.ч. культуральной среде) [45–47]. В дополнение к стандартному расчету кратности изменения экспрессии и идентификации дифференциально экспрессированных биоинформатических категорий молекул автоматический ИИ-анализ межмолекулярных взаимодействий позволяет отразить взаимодействия между различными биохимическими сигнальными путями и отдельными молекулами [46, 47], выявить новые механизмы развития болезней системы кровообращения и связанных с ними типовых патологических процессов [45, 47], а также предположить перспективные биомаркеры для молекулярной диагностики и мишени для экспериментальной терапии [45–47]. Характер и большое количество данных, получаемых в омиксных исследованиях, фактически делает невозможным анализ таких массивов без использования ИИ-инструментов, в особенности исследователям без расширенной биоинформатической подготовки [47]. В то же время для ИИ-инструментов анализ табличных данных и выявление взаимосвязей между ними является совершенно рутинной задачей, что уже на текущий момент времени существенно упрощает обработку соответствующих данных [14, 45–47].

Общие ограничения применения ИИ-инструментов

Немаловажным фактором, ограничивающим внедрение алгоритмов на основе генеративного ИИ в экспериментальную и трансляционную медицину (и приобретающим особую актуальность в связи с распространением ИИ-генерации кода), является отсутствие единых стандартов и даже общих принципов разработки таких инструментов [14, 18, 48]. По сути, каждая из научно-исследовательских групп в настоящее время имеет доступ и технические возможности к созданию собственных программ для ЭВМ, каждая из которых имеет уникальный код и может быть зарегистрирована как объект интеллектуальной собственности

(результат интеллектуальной деятельности) в реестре Федерального института промышленной собственности (ФИПС) и Единой государственной информационной системе учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ (ЕГИСУ НИОКТР). Программное обеспечение, разработанное на основе персонифицированных текстовых запросов с помощью ИИ-генераторов кода, может содержать соответствующие артефакты (к примеру, включенные в исходный код поправочные коэффициенты для полуколичественного или количественного анализа), оптимизирующие его использование для обучающего массива данных и учитывающие нюансы методологии исследований отдельной научной группы, однако искажающие результаты при анализе иных массивов данных другими исследователями при независимой валидации или решении собственных задач [49]. Кроме того, немаловажным фактором при разработке собственного программного обеспечения с помощью генеративного ИИ является высокая вероятность наличия методологических ошибок в исходном коде программы [49]. Сгенерированный код может содержать систематические ошибки в осуществлении статистических расчетов (например, рассчитывать медиану как среднее значение), обработке редких случаев (в частности, игнорировать их для искусственного повышения эффективности) и алгоритмах оптимизации функционирования (что снижает производительность и может приводить к непредсказуемым ошибкам) [49, 50]. Многие из этих ошибок возможно выявить только на этапе внешней валидации в случае расхождения результатов анализа, а для их исправления необходимо обладать соответствующими компетенциями [50]. Разнообразие чат-ботов на основе больших языковых моделей (ChatGPT, Gemini, Claude, Grok, Perplexity, YandexGPT, GigaChat) и использование одновременно нескольких из них для составления корректных запросов и проверки написанного кода позволяет избежать части этих проблем, однако не является гарантией корректной работы алгоритма без кросс-валидации разработанного программного обеспечения [49]. Кроме того, такое многообразие языковых моделей не способствует стандартизации и унификации написанного кода, что в совокупности со всем вышеизложенным только усугубляет проблему прозрачности ИИ-алгоритмов.

Это контрастирует с принятой в клинической кардиологии концепцией доказательной медицины, основанной на принципах стандартизации проведения рандомизированных контролируемых испытаний и их метаанализов, а также на унификации подходов к диагностике и лечению болезней системы кровообращения и связанных с ними типовых патологических процессов на основе клинических рекомендаций. Например, при анализе ИИ-алгоритмов для стратификации риска инсульта авторы акцентировали вни-

мание на том, что все разработанные ИИ-модели отличаются по типам анализируемых омиксных данных, стратегиям обучения моделей, контрольным точкам и методам валидации, что делает результаты трудносопоставимыми [14]. В работах по машинной идентификации атеросклеротических бляшек была подчеркнута высокая гетерогенность результатов исследований, обусловленная различиями в архитектуре моделей, размере выборок и протоколах подготовки обучающих и валидационных баз данных [10]. В ряде обзоров отмечается, что информация о гиперпараметрах моделей, особенностях подготовки данных и этапах обучения алгоритмов часто представлена неполно вследствие отсутствия единых требований к публичному представлению таких данных [2, 10, 14, 23]. Все вышеперечисленное также затрудняет воспроизводимость исследований и независимую проверку результатов другими исследовательскими группами.

Заключение

На текущий момент времени можно констатировать, что ИИ-инструменты уже сейчас существенно расширяют возможности поиска, систематизации и анализа научной информации. Нейросетевые алгоритмы обработки естественного языка позволяют автоматизировать классификацию публикаций и выделение смысловых ориентиров для последующей научно-исследовательской работы, что значительно увеличивает скорость работы в условиях постоянно растущего объема научных данных. Аналогичным образом ИИ-инструменты способны автоматически сегментировать анатомические, гистологические и субклеточные структуры на основе машинного обучения, выявлять гисто- и цитопатологические изменения и проводить количественную морфометрию объектов интереса в биологических тканях и клеточных культурах. Вероятно, в ближайшем будущем это позволит существенно уменьшить время проведения доклинических исследований и ускорить трансляцию соответствующих фармакологических вмешательств и медицинских изделий в клинические испытания. Способность ИИ-инструментов идентифицировать нетипичные паттерны в стандартизированных массивах табличных и графических данных, а также определять закономерности в слабоструктурированных и неструктурированных данных различного рода (к примеру, в записях электрокардиограмм лабораторных животных, массивах данных омиксных исследований и библиотеках сведений о структуре молекул) позволяет принципиально упростить процесс их обработки, выявить скрытые закономерности организации и функционирования биологических объектов и улучшить качество интерпретации результатов.

Среди преимуществ широкого внедрения ИИ следует отметить неизбежное расширение спектра базовых инструментов для анализа научных результатов.

Вероятнее всего, уже в ближайшем будущем станет реальностью ситуация, когда клинический исследователь сможет загрузить предварительно обработанный файл с омиксными данными (к примеру, в формате *xlsx) в специализированное программное обеспечение, синхронизированное с биоинформатическими библиотеками (в частности, Gene Ontology) и получить структурированные результаты анализа с уникальными различиями между фенотипами клеточных популяций, лабораторных животных или пациентов. Ключевым преимуществом ИИ в данном контексте является возможность автоматической идентификации взаимодействий между сигнальными путями или отдельными молекулами, позволяющая провести реконструкцию патогенеза изучаемого патологического процесса. Программное обеспечение подобного рода технически выступает в качестве своеобразного "моста" между фундаментальной и клинической кардиологией, принципиально облегчая трансляцию результатов биохимических и патофизиологических исследований в контекст фармакологии и терапии.

Активное развитие вайбкодинга (создания программ для ЭВМ при помощи ИИ-генераторов кода) устраняет один из основных барьеров для автоматизации обработки данных в фундаментальной кардиологии. Соответствующие научные лаборатории имеют накопленные в процессе экспериментальной работы стандартизированные и высококачественные массивы обучающих данных, однако объективно слабая интеграция между научными сотрудниками и разработчиками программного обеспечения ранее препятствовала разработке соответствующих цифровых решений для автоматизации технологических процессов. Распространение практики использования ИИ-генераторов кода практически неизбежно приведет к созданию многообразия соответствующих решений для научных задач и вероятной конкуренции между ними на международном рынке. Ключевым техническим преимуществом в этом контексте становится репрезентативность массива обучающих данных, которая обуславливает качество соответствующего программного продукта и его способность решать реальные экспериментальные задачи. Узкая специализация каждого из таких решений может позволить получить научно-технологический приоритет в соответствующем сегменте рынка и реализовать связанные с этим преимущества.

К основным проблемам внедрения ИИ-инструментов в экспериментальную и трансляционную кардиологию относятся недостаточная внешняя валидация многих моделей, ограниченная воспроизводимость результатов на разнородных выборках, критическая зависимость алгоритмов от качества обучающих данных, недостаточная интерпретируемость моделей. Отдельно следует отметить принципиальное несоответствие между отсутствием каких-либо стандартов при разработке ИИ-инструментов на доклинических

этапах исследования и концепцией доказательной медицины, являющейся одним из краеугольных камней клинической кардиологии.

Отношения и деятельность. Работа выполнена при поддержке комплексной программы фундаментальных научных исследований СО РАН в рамках фундаментальной темы НИИ КПССЗ № 0419-2024-0001 "Разработка новых фармакологических подходов к экспериментальной терапии атеросклероза, технологий серийного производства реактивов и расходных

материалов для изучения физиологии и патофизиологии сердечно-сосудистой системы и программного обеспечения на основе искусственного интеллекта для автоматизированной диагностики патологий системы кровообращения и автоматизированного расчета сердечно-сосудистого риска" при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках национального проекта "Наука и университеты", <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/5090V6DKTDEZ3L37R544GP18>.

Декларация ИИ. Не представлена.

Литература/References

- Tian T, Zhang X, Zhang F, et al. Harnessing AI for advancing pathogenic microbiology: a bibliometric and topic modeling approach. *Front Microbiol.* 2024;15:1510139. doi:10.3389/fmicb.2024.1510139.
- Ferreira Santos J, Ladeiras-Lopes R, Leite F, et al. Applications of large language models in cardiovascular disease: a systematic review. *Eur Heart J Digit Health.* 2025;6(4):540-53. doi:10.1093/ehjdh/ztaf028.
- Soloviev IA, Kurochkina ON. Artificial intelligence applications in cardiology: a review. *Russian Journal of Cardiology.* 2024;29(11S):5673. (In Russ.) Соловьев И.А., Курочкина О.Н. Приложения искусственного интеллекта в кардиологии: обзор. *Российский кардиологический журнал.* 2024;29(11S):5673. doi:10.15829/1560-4071-2024-5673.
- Zhang H, Ma W, Zhou X, et al. Artificial intelligence in cerebrovascular disease management: a comprehensive review of risk prediction, diagnosis, therapeutic optimization, and clinical translation. *Vasc Health Risk Manag.* 2025;21:949-64. doi:10.2147/VHRM.S555592.
- Zarei R, Torgerson L. A systematic literature review of precision anesthesia through machine learning: automated drug titration and real-time physiologic optimization. *Cureus.* 2025;17(11):97747. doi:10.7759/cureus.97747.
- Ma-Van-de AYu, Fefelova EV, Shirshov YuA, et al. Neural network analysis as a way to assess some pathogenetic aspects of neuroinflammation in hypertensive disease. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2025;14(4):161-75. (In Russ.) Ма-Ван-да А. Ю., Фёфелова Е. В., Шишов Ю. А. и др. Нейросетевой анализ как способ оценки некоторых патогенетических аспектов нейровоспаления при гипертонической болезни. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2025;14(4):161-75. doi:10.17802/2306-1278-2025-14-4-161-175.
- Meyer JG. Vibe coding omics data analysis applications. *J Proteome Res.* 2026;25(2):1191-7. doi:10.1021/acs.jproteome.5c00984.
- Pearce H, Ahmad B, Tan B, et al. Asleep at the Keyboard? Assessing the Security of GitHub Copilot's Code Contributions. *Commun. ACM.* 2025;68(2):96-105. doi:10.1145/3610721.
- Yu H, Davoudi M, Sadegh-Nejadi S, et al. Impact of monotherapy and combination therapy with glucagon-like peptide-1 receptor agonists on exosomal and non-exosomal microRNA signatures in type 2 diabetes mellitus: a systematic review. *J Transl Med.* 2025;23(1):477. doi:10.1186/s12967-025-06461-y.
- Muhammad A, Zheng XY, Gan HL, et al. AI-enhanced morphological phenotyping in humanized mouse models: a transformative approach to infectious disease research. *Biophysica.* 2025;5(4):43. doi:10.3390/biophysica5040043.
- Jaradat M, Awad M. Explainable AI in cardiology diagnostics: a systematic review of machine learning, meta-heuristic optimization, and clinical text mining for coronary artery disease. *Int J Med Inform.* 2026;211:106321. doi:10.1016/j.ijmedinf.2026.106321.
- Sen CK. Artificial intelligence tools in biomedical research: part 1-literature search and knowledge mining. *Antioxid Redox Signal.* 2026;44(1-3):1-10. doi:10.1177/15230864251405885.
- Jin Q, Leaman R, Lu Z. PubMed and beyond: biomedical literature search in the age of artificial intelligence. *EBioMedicine.* 2024;100:104988. doi:10.1016/j.ebiom.2024.104988.
- Yoo HY, Shin H, Kim EJ, et al. Machine learning for predicting stroke risk stratification using multiomics data: systematic review. *J Med Internet Res.* 2026;28:85654. doi:10.2196/85654.
- Chen S, Wu C, Zhang Z, et al. The role of artificial intelligence in aortic valve stenosis: a bibliometric analysis. *Front Cardiovasc Med.* 2025;12:1521464. doi:10.3389/fcvm.2025.1521464.
- Wu YD, Dong JX, Yu FM, et al. Mapping the global research landscape and trends of older people living alone: a bibliometric analysis. *Front Aging.* 2025;6:1524673. doi:10.3389/fragi.2025.1524673.
- Beydoun SA, Gagné C, Neubarth NS, et al. Patient- and family-centered care recommendations in cardiology guidelines: an AI-driven systematic review. *CJC Open.* 2025;7(9):1218-25. doi:10.1016/j.cjco.2025.05.017.
- Fülöp P, Tóth S, Porubán T, et al. Machine learning for warfarin therapy: a systematic review. *Pharmaceuticals (Basel).* 2025;18(10):1544. doi:10.3390/ph18101544.
- Alrabadi B, Marouf M, Bashaireh T, et al. Systematic review and meta-analysis of AI accuracy in warfarin dose prediction across ethnic groups. *Eur J Clin Pharmacol.* 2026;82(2):55. doi:10.1007/s00228-025-03989-2.
- Harandi H, Shafaati M, Salehi M, et al. Artificial intelligence-driven approaches in antibiotic stewardship programs and optimizing prescription practices: a systematic review. *Artif Intell Med.* 2025;162:103089. doi:10.1016/j.artmed.2025.103089.
- Alqahtani SS, Menachery SJ, Alshahrani A, et al. Artificial intelligence in clinical pharmacy — A systematic review of current scenario and future perspectives. *Digit Health.* 2025;11:20552076251388145. doi:10.1177/20552076251388145.
- Shishkova D, Markova V, Yurieva Y, et al. Palmitic but not oleic acid induces pro-inflammatory dysfunction of human endothelial cells from different vascular beds in vitro. *Int J Mol Sci.* 2025;26(24):12148. doi:10.3390/ijms262412148.
- Alabed S, Anderson A, Maiter A, et al. Large language models for simplifying radiology reports: a systematic review and meta-analysis of patient, public, and clinician evaluations. *Lancet Digit Health.* 2026;8(2):100960. doi:10.1016/j.landig.2025.100960.
- Teperikidis L, Boulimpou A, Chownk M, et al. Colchicine for major adverse cardiovascular events: an updated ChatGPT-assisted systematic review and meta-analysis. *J Cardiovasc Pharmacol.* 2025. doi:10.1097/FJC.0000000000001780. Epub ahead of print.
- Mishra A, Majumder A, Komminen D, et al. Role of generative artificial intelligence in personalized medicine: a systematic review. *Cureus.* 2025;17(4):82310. doi:10.7759/cureus.82310.
- Huang Q, Wu S, Ou Z, et al. Computational pathology: a comprehensive review of recent developments in digital and intelligent pathology. *Intell Oncol.* 2025;1(2):139-59. doi:10.1016/j.intonc.2025.03.004.
- Dinc R, Ardic N. AI-enabled reduction of animal use in cardiovascular translational medicine: regulatory and technological perspectives. *Life (Basel).* 2025;15(12):1916. doi:10.3390/life15121916.
- Ye L, Chang CC, Li Q, et al. Advanced imaging techniques for atherosclerosis and cardiovascular calcification in animal models. *J Cardiovasc Dev Dis.* 2024;11(12):410. doi:10.3390/jcdd11120410.
- Shishkova D, Kanonykina A, Kondratiev E, et al. Early supplementation with branched-chain amino acids ameliorates lipid retention in aortic valves of ApoE-knockout mice. *Int J Mol Sci.* 2025;26(23):11259. doi:10.3390/ijms262311259.
- Shishkova D, Markova V, Markova Y, et al. Physiological concentrations of calciprotein particles trigger activation and pro-inflammatory response in endothelial cells and monocytes. *Biochemistry (Mosc).* 2025;90(1):132-60. doi:10.1134/S0006297924604064.
- Laptev VV, Kochergin NA. Application of object detection technology in aortography key-point tracking. *Complex Issues of Cardiovascular Diseases.* 2024;13(1):144-51. (In Russ.) Лаптев В.В., Кочергин Н.А. Применение технологии object detection в задаче обнаружения ключевых точек аортографии. *Комплексные проблемы сердечно-сосудистых заболеваний.* 2024;13(1):144-51. doi:10.17802/2306-1278-2024-13-1-144-151.
- Rad MS, Huang JV, Hosseini MM, et al. Deep learning for digital pathology: a critical overview of methodological framework. *J Pathol Inform.* 2025;19:100514. doi:10.1016/j.jpi.2025.100514.
- Kostyunin AE, Glushkova TV, Bogdanov LA, et al. Expression of cysteine cathepsins B/K/L/S/V/Z in failed bioprosthetic heart valves. *Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine.* 2023;38(2):166-73. (In Russ.) Костюнин А.Е., Глушкова Т.В., Богданов Л.А. и др. Особенности экспрессии цистеиновых катепсинов В/К/Л/С/В/З в биопротезах клапанов сердца, эксплантированных по причине дисфункции. *Сибирский медицинский журнал.* 2023;38(2):166-73. doi:10.29001/2073-8552-2023-38-2-166-173.
- Albalawi ES, Qayyum J, Qayyum J. Artificial intelligence based quantification of T lymphocyte infiltrate predicts prognosis in high grade breast cancer using deep learning and statistical validation. *Discov Oncol.* 2025;16:2213. doi:10.1007/s12672-025-04185-5.
- Li W, Ye S, Jin Z, et al. Artificial intelligence in digital pathology of breast cancer, new era of practice? *Int J Surg.* 2025;111(11):8270-83. doi:10.1097/JS9.0000000000002953.
- Privalova IL, Shevelov OA, Khodorovich NA, et al. Ozerova I. Electrocardiography in rats in experimental studies (review of the literature). *Genetics and breeding of animals.* 2019;(2):108-20. (In Russ.) Привалова И.Л., Шевелев О.А., Ходорович Н.А. и др. Электrokардиография у крыс в экспериментальных исследованиях (обзор литературы). *Генетика и разведение животных.* 2019;(2):108-20. doi:10.31043/2410-2733-2019-2-108-120.

37. Maksakova AY, Kim SA, Ashurova MA, et al. Identification of atrial fibrillation predictors on an electrocardiogram using a neural network. *Russian Journal of Cardiology*. 2024;29(11S):5907. (In Russ.) Максакова А.Ю., Ким С.А., Ашурова М.А. и др. Выявление предикторов развития фибрилляции предсердий на электрокардиограмме с помощью нейросети. *Российский кардиологический журнал*. 2024;29(11S):5907. doi:10.15829/1560-4071-2024-5907.
38. Chen F, Zhang HY, Wan YL, et al. Artificial intelligence-assisted organoid construction in congenital heart disease: current applications and future prospects. *Front Bioeng Biotechnol*. 2025;13:1691972. doi:10.3389/fbioe.2025.1691972.
39. Kusumoto D, Seki T, Sawada H, et al. Anti-senescent drug screening by deep learning-based morphology senescence scoring. *Nat Commun*. 2021;12(1):257. doi:10.1038/s41467-020-20213-0.
40. Härtter D, Hauke L, Driehorst T, et al. SarcAsM: AI-based multiscale analysis of sarcomere organization and contractility in cardiomyocytes. *bioRxiv*. 2025. doi:10.1101/2025.04.29.650605.
41. Kalkunte N, Cisneros J, Castillo E, et al. A review on machine learning approaches in cardiac tissue engineering. *Front Biomater Sci*. 2024;3:1358508. doi:10.3389/fbiom.2024.1358508.
42. Eini P, Eini P, Serpoush H, et al. Machine learning-based classification of carotid plaques via ultrasound: a systematic review and meta-analysis of diagnostic performance. *Int J Emerg Med*. 2025;18(1):247. doi:10.1186/s12245-025-01065-1.
43. Ye S, Xu C, Li H, et al. Enhancing lateral flow immunoassay performance for cardiac troponin I detection with pore-size tailored silica nanoparticles and smartphone-based "AdaptiScan" analysis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2025;13:1568719. doi:10.3389/fbioe.2025.1568719.
44. Li Y, Yao Y, Hua Q, et al. Quantitative and rapid lateral flow immunoassay for cardiac troponin I using dendritic mesoporous silica nanoparticles and gold nanoparticles. *Anal Methods*. 2025;17(4):698-707. doi:10.1039/d4ay02060j.
45. Lin M, Guo J, Gu Z, et al. Machine learning and multi-omics integration: advancing cardiovascular translational research and clinical practice. *J Transl Med*. 2025;23(1):388. doi:10.1186/s12967-025-06425-2.
46. Kant S, Deepika, Roy S. Integrative multi-omics and artificial intelligence: a new paradigm for systems biology. *OMICS*. 2025;29(12):576-87. doi:10.1177/15578100251392371.
47. Saboktakin Rizi S, Stamenkovic A, Ravandi A. Integrative omics approaches in cardiovascular disease research: current trends and future directions. *Can J Cardiol*. 2025;41(8):1642-5. doi:10.1016/j.cjca.2025.02.016.
48. Lin JY, Lai JK, Chen JY, et al. Global insights into MRSA bacteremia: a bibliometric analysis and future outlook. *Front Microbiol*. 2025;15:1516584. doi:10.3389/fmicb.2024.1516584.
49. Tambon F, Moradi-Dakheel A, Nikanjam A, et al. Bugs in large language models generated code: an empirical study. *Empir Softw Eng*. 2025;30:65. doi:10.1007/s10664-025-10614-4.
50. Pendyala VS, Thakur NB. Performance and interpretability analysis of code generation large language models. *Neurocomputing*. 2025;656:131461. doi:10.1016/j.neucom.2025.131461.

Адреса организаций авторов: ФГБНУ Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний, бульвар имени академика Л.С. Барбараша, д. 6, Кемерово, 650001, Россия.

Addresses of the authors' institutions: Research Institute for Complex Issues of Cardiovascular Diseases, Acad. L. S. Barbarash Boulevard, 6, Kemerovo, 650001, Russia.