



Интеллектуальное здравоохранение XXI века в эпоху искусственного интеллекта: систематический обзор

И. А. Наркевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Наркевич И. А. – д. фарм. н., профессор; ректор, заведующий кафедрой управления и экономики фармации. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5483-6626>.



АВТОР, ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ПЕРЕПИСКУ

Наркевич Игорь Анатольевич,
e-mail: Fiz2026@yandex.ru.



РЕДАКЦИОННАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Поступила: 29.06.2026
Принята: 13.07.2026
Опубликована: 04.08.2026



ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Введение. Стремительное развитие технологий искусственного интеллекта и расширение сфер их применения в клинической медицине и фармацевтической отрасли обуславливают необходимость систематизации современных научных данных, анализа существующих подходов к нормативно-правовому регулированию и оценки перспектив формирования интеллектуального здравоохранения как новой организационно-технологической парадигмы системы охраны здоровья.

Цель обзора: обобщение современных научных данных о применении технологий искусственного интеллекта в клинической медицине и фармацевтической отрасли, анализ основных направлений их практического использования, нормативно-правовых аспектов регулирования, а также определение перспектив развития интеллектуального здравоохранения.

На основе систематического обзора литературы, выполненного в соответствии с рекомендациями PRISMA 2020, установлено, что технологии

Наркевич И. А. Интеллектуальное здравоохранение XXI века в эпоху искусственного интеллекта: систематический обзор. Фармация и интеллектуальное здравоохранение. 2026;1(1).



КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.



ВКЛАД АВТОРА

И. А. Наркевич – разработка концепции и дизайна исследования, поиск и анализ научной литературы, интерпретация полученных данных, написание и редактирование текста рукописи.



ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор заявляет об отсутствии финансирования.

искусственного интеллекта активно применяются в диагностике заболеваний, поддержке принятия клинических решений, хирургии, разработке лекарственных препаратов, фармаконадзоре и персонализации медицинской помощи. Рассмотрены международные подходы к регулированию технологий искусственного интеллекта, а также особенности формирования отечественной нормативно-правовой модели. Проведен анализ структуры зарегистрированных в Российской Федерации медицинских изделий с технологиями искусственного интеллекта, позволивший определить основные направления их практического применения и установить преобладание диагностических решений. Показано, что последовательная интеграция технологий искусственного интеллекта, больших данных и цифровых платформ создает предпосылки для формирования интеллектуального здравоохранения как новой организационно-технологической парадигмы системы охраны здоровья.

Заключение. Технологии искусственного интеллекта выступают одним из ключевых факторов трансформации здравоохранения и фармацевтической отрасли. Последовательная интеграция интеллектуальных технологий создает предпосылки для формирования интеллектуального здравоохранения как новой организационно-технологической парадигмы системы охраны здоровья, основанной на конвергенции биомедицинских наук, цифровых платформ и методов искусственного интеллекта.

Ключевые слова: искусственный интеллект, интеллектуальное здравоохранение, цифровая медицина, фармация, медицинские изделия.

Intelligent healthcare of the 21st century in the era of artificial intelligence: a systematic review

Igor A. Narkevich

Saint-Petersburg State Chemical and Pharmaceutical University, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT



ORCID

Igor A. Narkevich – <https://orcid.org/0000-0002-5483-6626>.



CORRESPONDING AUTHOR

Igor A. Narkevich,
e-mail: Fiz2026@yandex.ru.



EDITORIAL INFORMATION

Received: 29.06.2026
Accepted: 13.07.2026
Published: 04.08.2026



FOR CITATION

Narkevich I. A. Intelligent Healthcare in the Twenty-First Century in the Era of Artificial Intelligence: A Systematic Review. *Pharmacy and Intelligent Healthcare*. 2026;1(1).



CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Introduction. The rapid development of artificial intelligence technologies and the expansion of their applications in clinical medicine and the pharmaceutical industry necessitate the systematization of current scientific data, the analysis of existing approaches to regulatory and legal regulation, and the assessment of prospects for the formation of intelligent healthcare as a new organizational and technological paradigm of the health care system.

Aim. To summarize current scientific data on the use of artificial intelligence technologies in clinical medicine and the pharmaceutical industry, to analyze the main areas of their practical application, regulatory and legal aspects, and to determine the prospects for the development of intelligent healthcare.

Based on a systematic literature review conducted in accordance with the PRISMA 2020 guidelines, it was established that artificial intelligence technologies are actively used in disease diagnosis, clinical decision support, surgery, drug development, pharmacovigilance, and personalization of medical care. International approaches to the regulation of artificial intelligence technologies are considered, as well as the features of the formation of a domestic regulatory model. An analysis of the structure of medical devices with artificial intelligence technologies registered in the Russian Federation was carried out, which made it possible to determine the main areas of their practical application and establish the predominance of diagnostic solutions. It is shown that



AUTHOR CONTRIBUTION

D. V. Voshev – concept development, data analysis, editing of the manuscript; D. S. Cisse – data collection, literature review, preparation of the original text of the manuscript.



FUNDING

The authors claim a lack of funding.

the consistent integration of artificial intelligence, big data and digital platforms creates prerequisites for the formation of intelligent healthcare as a new organizational and technological paradigm of the health care system.

Conclusion. Artificial intelligence technologies are one of the key factors in the transformation of healthcare and the pharmaceutical industry. The consistent integration of intelligent technologies creates prerequisites for the formation of intelligent healthcare as a new organizational and technological paradigm of the health care system, based on the convergence of biomedical sciences, digital platforms and artificial intelligence methods.

Keywords: artificial intelligence, intelligent healthcare, digital medicine, pharmacy, medical devices.

ВВЕДЕНИЕ

В первые десятилетия XXI века здравоохранение вступило в фазу глубокой трансформации, обусловленной становлением парадигмы, основанной на данных. По мере накопления и интеграции многомерной клинической информации профилактические, диагностические, терапевтические и исследовательские процессы все в большей степени приобретают характер данных-ориентированных систем, что способствует повышению точности клинических решений и укреплению доказательной базы управления здравоохранением.

Подобный сдвиг определяется экспоненциальным расширением доступных источников медицинской информации, включая повсеместное внедрение электронных медицинских карт, прогресс мультиомиксных

технологий, обеспечивающих возможность комплексного изучения геномных, транскриптомных, протеомных и метаболомных характеристик организма, а также широкое распространение носимых «умных» устройств и систем непрерывного мониторинга физиологических параметров [1-4]. Формирование многоисточниковых гетерогенных массивов данных создает принципиально новые возможности для изучения фенотипической структуры заболеваний и позволяет выявлять дополнительные биологические сигнатуры на различных уровнях организации живых систем, включая морфологические, функциональные и молекулярно-регуляторные механизмы, обеспечивая тем самым более целостное представление о состоянии здоровья как отдельного

индивидуума, так и популяции в целом [5].

В современных условиях, за последние десять лет искусственный интеллект (ИИ) прошел путь от преимущественно экспериментальной области вычислительных наук до ключевого фактора, определяющего структурные преобразования в фармацевтике и медицине. ИИ представляет собой совокупность вычислительных методов, алгоритмов и математических моделей, предназначенных для воспроизведения отдельных когнитивных функций человека, включая обучение, распознавание закономерностей и принятие решений [6]. В зависимости от уровня функциональных возможностей принято классифицировать «узкий» (англ. *Artificial Narrow Intelligence, ANI*), «общий» (англ. *Artificial General Intelligence, AGI*) и «суперинтеллект» (англ. *Artificial Superintelligence, ASI*) [7, 8]. Современные технологии ИИ, применяемые в медицине и фармацевтической отрасли, относятся преимущественно к категории «узкого» ИИ, ориентированного на решение конкретных прикладных задач, тогда как общий ИИ и искусственный суперинтеллект в настоящее время рассматриваются преимущественно в качестве теоретических концепций, отражающих возможные направления дальнейшей эволюции интеллектуальных технологий.

Одним из важнейших направлений развития ИИ является машинное

обучение (англ. *machine learning, ML*), основанное на построении алгоритмов, способных выявлять закономерности и формировать прогнозы на основе анализа данных. Разновидностью машинного обучения является глубокое обучение (англ. *deep learning, DL*), использующее многослойные искусственные нейронные сети, архитектурно напоминающие организацию нейронных взаимодействий в головном мозге человека [9]. В настоящее время технологии ИИ, машинного и глубокого обучения приобретают все более значимую роль в анализе, обработке и автоматизации больших массивов клинических и фармацевтических данных, обеспечивая интеллектуализацию процессов разработки лекарственных препаратов, клинических исследований и медицинской практики [10].

В фармацевтической отрасли ИИ постепенно охватывает все стадии цикла лекарственных средств, начиная с идентификации молекулярных мишеней и рационального дизайна новых соединений и заканчивая оптимизацией доклинических и клинических исследований, прогнозированием фармакокинетических и токсикологических свойств, организацией фармаконадзора, управлением производственными процессами и обеспечением логистических цепочек [11]. Подобная трансформация сопровождается формированием концепции интеллектуальной фармации, представляющей собой междисциплинарное

направление, основанное на конвергенции достижений биомедицинских наук, вычислительной биологии, технологий больших данных и систем ИИ [12].

Параллельно с этим наблюдается активное расширение сфер применения ИИ непосредственно в клинической практике. Современные интеллектуальные системы используются для анализа электронных медицинских карт, интерпретации медицинских изображений, прогнозирования течения заболеваний, оценки рисков неблагоприятных исходов, поддержки принятия клинических решений, персонализации лекарственной терапии, а также при планировании хирургических вмешательств и развитии роботизированных технологий [13]. Последовательная интеграция подобных решений способствует переходу от традиционной реактивной модели оказания медицинской помощи к концепции предиктивной, персонализированной и платформенно организованной медицины, ориентированной на непрерывное управление здоровьем человека.

Вместе с тем столь масштабное внедрение технологий ИИ сопровождается возникновением комплекса новых научных, методологических, этических, правовых и регуляторных вызовов. Применение данных технологий сопряжено с рядом серьезных проблем. Одной из них является ограниченная интерпретируемость алгоритмов, часто называемая феноменом

«черного ящика» (*англ. black box*). Существует также риск систематических ошибок и алгоритмической предвзятости. Воспроизводимость результатов представляет собой отдельную сложность. Кроме того, возникают вопросы относительно распределения юридической ответственности между разработчиками, медицинскими организациями и медицинскими работниками. Не менее важна задача обеспечения безопасности и конфиденциальности персональных медицинских данных пациентов.

Дополнительную актуальность приобретают проблемы нормативно-правового регулирования медицинских изделий (МИ) с технологиями ИИ, разработки механизмов оценки их безопасности и эффективности, а также формирования организационной инфраструктуры интеграции интеллектуальных систем в существующие модели оказания медицинской помощи [14].

Несмотря на стремительное расширение областей применения ИИ, большинство опубликованных исследований сосредоточено преимущественно на анализе отдельных технологических решений или специализированных направлений их использования. Вместе с тем вопросы комплексного осмысления процессов цифровой трансформации фармации и клинической медицины, особенностей нормативно-правового регулирования, а также перспектив формирования интеллектуального здравоохранения

остаются недостаточно систематизированными.

В связи с этим целью настоящего систематического обзора является обобщение современных научных данных о применении технологий ИИ в клинической медицине и фармацевтической отрасли, анализ основных направлений их практического использования, существующих подходов к нормативно-правовому регулированию, а также оценка ключевых преимуществ, ограничений и перспектив формирования интеллектуального здравоохранения как новой организационно-технологической парадигмы системы охраны здоровья XXI века.

Методы поиска источников

Данная работа представляет собой систематический анализ научной литературы, проведенный согласно актуальным международным стандартам PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) 2020. Эти рекомендации служат ориентиром для методологически корректного планирования, выполнения и изложения результатов систематических обзоров и метаанализов [15].

Источники информации и стратегия поиска

Поиск научных публикаций осуществлялся в международных и

отечественных библиографических базах данных PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science Core Collection, Embase, Google Scholar и eLibrary.ru. Дополнительно проводился поиск публикаций посредством анализа списков литературы релевантных исследований, обзорных статей и нормативно-правовых документов.

Поисковая стратегия формировалась с использованием комбинаций контролируемых терминов и свободных ключевых слов, отражающих основные направления применения технологий ИИ в фармации и медицине. В частности, использовались следующие поисковые запросы и их различные комбинации: «artificial intelligence», «machine learning», «deep learning», «generative artificial intelligence», «large language models», «digital health», «intelligent healthcare», «healthcare», «pharmacy», «drug discovery», «clinical decision support systems», «pharmacovigilance», «medical devices», «electronic health records», а также соответствующие русскоязычные эквиваленты: «искусственный интеллект», «машинное обучение», «глубокое обучение», «генеративный искусственный интеллект», «большие языковые модели», «цифровое здравоохранение», «интеллектуальное здравоохранение», «фармация», «разработка лекарств», «системы поддержки принятия клинических решений», «фармаконадзор», «медицинские устройства», «электронные медицинские карты».

Критерии включения и исключения

В систематический обзор включались оригинальные исследования, систематические обзоры, метаанализы, обзорные статьи, консенсусные документы, клинические рекомендации и нормативно-правовые акты, опубликованные на русском и английском языках. Предпочтение отдавалось публикациям, посвященным применению технологий ИИ в фармацевтической отрасли и клинической медицине, включая разработку лекарственных препаратов, системы поддержки принятия клинических решений, медицинские изделия (МИ) на основе технологий ИИ, цифровое здравоохранение, а также организационные, правовые и этические аспекты внедрения интеллектуальных технологий.

Критериями исключения являлись дублирующиеся публикации, материалы конференций, краткие сообщения, письма редактору, комментарии, препринты, публикации с недостаточной методологической обоснованностью, а также исследования, не имеющие непосредственного отношения к применению технологий ИИ в фармации и медицине.

Отбор исследований

Отбор публикаций проводился поэтапно с использованием методологических ориентиров PRISMA 2020. На первом этапе выполнялась идентификация публикаций в международных

и отечественных библиографических базах данных; на втором – удаление дублирующихся записей и скрининг названий и аннотаций; на третьем – полнотекстовая оценка потенциально релевантных источников на соответствие критериям включения и исключения. Итоговая схема отбора публикаций представлена в основной части обзора.

Алгоритм отбора исследований

В результате поиска в международных и отечественных библиографических базах данных, а также дополнительных источниках информации было идентифицировано 1082 публикации. После удаления дублирующихся записей проводился последовательный скрининг заголовков и аннотаций, в ходе которого исключались исследования, не соответствующие тематике настоящего обзора, а также публикации, не содержащие сведений о применении технологий ИИ в фармацевтической отрасли, клинической медицине и системе здравоохранения.

На следующем этапе осуществлялась полнотекстовая оценка потенциально релевантных публикаций на предмет соответствия заранее установленным критериям включения и исключения. Из дальнейшего анализа исключались работы с недостаточной методологической обоснованностью, публикации, не имеющие непосредственного отношения к предмету исследования, а также источники,

содержащие недостаточный объем информации для проведения качественного анализа.

Дополнительно поиск релевантных источников осуществлялся посредством анализа библиографических списков ранее отобранных публикаций, обзорных статей и официальных документов.

Извлечение и синтез данных

Из включенных в обзор публикаций извлекались сведения о направлениях применения технологий ИИ в фармацевтической отрасли и клинической практике, используемых алгоритмических подходах, областях практического внедрения, нормативно-правовых аспектах регулирования, а также существующих ограничениях и перспективах дальнейшего развития интеллектуальных технологий.

Учитывая выраженную методологическую и содержательную гетерогенность включенных исследований, проведение количественного метаанализа представлялось нецелесообразным. В связи с этим обобщение полученных данных осуществлялось посредством качественного тематического синтеза, предусматривающего систематизацию результатов по следующим основным направлениям: применение ИИ в фармации, использование интеллектуальных технологий в клинической практике, нормативно-правовое регулирование, а также методологические,

организационные и этические аспекты внедрения интеллектуальных систем.

Оценка качества источников

При анализе литературы особое внимание уделялось методологическому качеству исследований, уровню доказательности представленных данных, репрезентативности исследуемых выборок, воспроизводимости полученных результатов и актуальности используемой информации. Приоритет отдавался систематическим обзорам, метаанализам, крупным оригинальным исследованиям, международным консенсусным документам, а также официальным нормативно-правовым источникам.

Систематизация и интерпретация результатов осуществлялись с позиций комплексного междисциплинарного подхода, предполагающего рассмотрение ИИ не только в качестве совокупности отдельных вычислительных технологий, но и как одного из ключевых факторов трансформации фармацевтической отрасли и формирования интеллектуального здравоохранения.

Результаты отбора источников

В результате последовательного процесса идентификации, скрининга и оценки соответствия критериям включения в систематический обзор была включена 41 публикация,

составившая окончательный массив источников для последующего тематического анализа. Алгоритм отбора

публикаций представлен на рисунке 1.

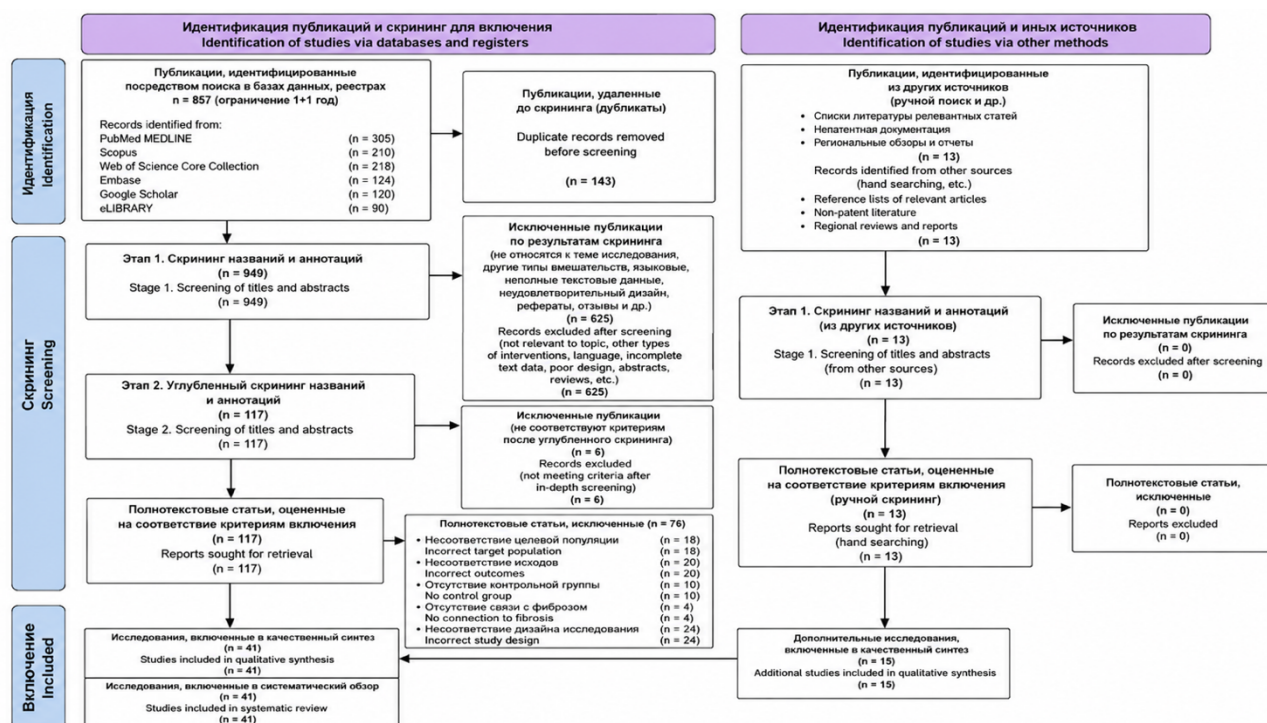


Рисунок 1. PRISMA-схема отбора публикаций для систематического обзора

Figure 1. PRISMA flow diagram of publication selection for the systematic review

Обобщение данных отобранных источников позволило выделить ключевые тематические блоки обзора: концепция интеллектуального здравоохранения, международные и отечественные подходы к регулированию технологий искусственного интеллекта, применение искусственного интеллекта в клинической медицине, фармацевтической отрасли, фармаконадзоре, медицинских изделиях и организационно-управленческих процессах здравоохранения.

Концепция интеллектуального здравоохранения

Проведенный анализ научной литературы позволяет определить интеллектуальное здравоохранение как новую организационно-технологическую парадигму системы охраны здоровья, основанную на интеграции технологий ИИ, больших данных, цифровых платформ, мультиомных исследований, Интернета медицинских вещей и систем поддержки принятия решений, обеспечивающую интеллектуализацию процессов профилактики, диагностики, лечения, разработки лекарственных препаратов, фармаконадзора и управления здравоохранением.

В отличие от концепции цифрового здравоохранения, ориентированной преимущественно на информатизацию и цифровизацию отдельных процессов, интеллектуальное здравоохранение предполагает формирование единой дата-центрированной экосистемы, в рамках которой осуществляется непрерывный сбор, интеграция, обработка и интерпретация гетерогенных медицинских и фармацевтических данных с использованием интеллектуальных алгоритмов. В этой связи ИИ следует рассматривать не как самостоятельный субъект принятия решений, а как инструмент расширения когнитивных возможностей медицинских и фармацевтических работников, обеспечивающий повышение качества, доступности и эффективности медицинской помощи.

С позиций системного подхода клиническая медицина и фармацевтическая отрасль выступают взаимосвязанными компонентами интеллектуального здравоохранения, а последовательная интеграция интеллектуальных технологий формирует предпосылки для дальнейшей трансформации системы охраны здоровья и достижения технологического лидерства в области биомедицины.

Международные подходы к правовому регулированию технологий ИИ

Проведенный анализ показал, что развитие нормативно-правового регулирования технологий ИИ в

различных странах осуществляется по неоднородным моделям, отражающим особенности национальных правовых систем и регуляторных приоритетов. Вместе с тем общей тенденцией является переход к риск-ориентированным подходам, предусматривающим усиление требований к безопасности, прозрачности алгоритмов, качеству данных и человеческому контролю над функционированием интеллектуальных систем.

Одним из наиболее системных примеров риск-ориентированного регулирования является Регламент об искусственном интеллекте (AI Act), устанавливающий единые требования к разработке, внедрению и эксплуатации систем ИИ [16].

В соответствии с положениями AI Act системы ИИ, применяемые в клинической медицине и фармацевтической отрасли, отнесены к категории высокорисковых технологий. Для таких систем предусмотрены повышенные требования к управлению рисками, качеству и репрезентативности данных, технической документации, прозрачности алгоритмов, прослеживаемости принимаемых решений и обеспечению надлежащего человеческого контроля. Отдельное внимание в документе уделено моделям общего назначения (*англ. General-Purpose AI*), значение которых существенно возрастает в контексте разработки лекарственных препаратов, анализа биомедицинских данных и проведения фармацевтических исследований.

Другим примером комплексного регулирования является Регламент о пространстве данных здравоохранения (англ. *European Health Data Space Regulation, EHDS*), формирующий единые принципы обращения медицинских данных и механизмы их трансграничного обмена. EHDS расширяет возможности использования медицинской информации в научных исследованиях, разработке лекарственных препаратов и общественном здравоохранении, одновременно усиливая требования к защите персональных данных и информационной безопасности».

В руководстве Европейского агентства по лекарственным средствам (англ. *European Medicines Agency, EMA*)¹ определены подходы к применению ИИ на различных этапах жизненного цикла лекарственного препарата – от доклинических исследований и производства до клинической оценки и фармаконадзора. Особое значение придаётся интерпретируемости алгоритмов, качеству исходных данных, минимизации систематических смещений, независимой валидации и мониторингу непрерывно обучающихся систем.

В международной практике также применяется децентрализованный отраслевой подход, при котором регулирование технологий ИИ осуществляется в рамках законодательства,

относящегося к отдельным сферам деятельности, и рекомендаций профильных регуляторов. Ключевое значение в данной модели имеет концепция управления полным жизненным циклом продукта (англ. *Total Product Lifecycle*), предусматривающая контроль интеллектуальных систем на всех этапах их существования – от разработки и клинической оценки до пострегистрационного мониторинга и вывода из эксплуатации (полный цикл) [17].

Регуляторная политика FDA допускает использование адаптивных алгоритмов и самообучающихся моделей, однако их применение сопряжено с необходимостью обеспечения прозрачности, клинической обоснованности и непрерывного контроля эффективности и безопасности. Данный отраслевой подход отличается сравнительной гибкостью и ориентированностью на ускоренное внедрение инноваций. Существенную роль в формировании границ ответственности и правоприменительной практики при этом играют судебные механизмы и прецедентное право [18].

Всемирная организация здравоохранения

Вклад в формирование международных подходов к регулированию технологий ИИ в здравоохранении также вносит Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ),

¹ Reflection paper on the use of Artificial Intelligence (AI) in the medicinal product lifecycle. Adopted. Reference Number:

EMA/CHMP/CVMP/83833/2023: <https://www.ema.europa.eu/en/use-artificial-intelligence-ai-medicinal-product-lifecycle-scientific-g...>

акцентирующая внимание на необходимости обеспечения глобального управления, соблюдения этических принципов и недопущения усиления существующих форм неравенства при внедрении интеллектуальных технологий. В документах ВОЗ подчеркивается, что устойчивое развитие цифрового здравоохранения должно основываться на принципах прозрачности, подотчетности, инклюзивности и общественного доверия, рассматриваемых в качестве необходимых условий безопасной цифровой трансформации систем здравоохранения². Особое значение при этом придается обеспечению конфиденциальности и надлежащей защите персональных медицинских данных пациентов, что рассматривается в качестве одного из фундаментальных принципов применения технологий ИИ в сфере охраны здоровья.

Российская Федерация

В Российской Федерации формирование нормативно-правовой базы в области ИИ осуществляется поэтапно и характеризуется сочетанием стратегических, экспериментальных и

отраслевых механизмов регулирования. Основу государственной политики в данной сфере составляет Указ Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации»³, которым утверждена Национальная стратегия развития ИИ на период до 2030 года. Важное значение также имеют Федеральный закон от 31 июля 2020 г. № 258-ФЗ «Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых инноваций»⁴ и Федеральный закон от 24 апреля 2020 г. № 123-ФЗ⁵, устанавливающий специальное регулирование разработки и внедрения технологий ИИ в городе Москве. Дополнительный импульс развитию интеллектуального здравоохранения придал Указ Президента Российской Федерации от 08.12.2025 г. № 896 О Стратегии развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2030 года⁶, определяющей приоритетные направления технологической модернизации отрасли. В числе стратегических задач документ предусматривает разработку информационных систем

² World Health Organization (WHO). Ethics and Governance of Artificial Intelligence for Health: Large Multi-Modal Models. WHO Guidance. WHO; 2024

³ Указ Президента РФ от 10.10.2019 № 490 (ред. от 15.02.2024) "О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации" (ссылка: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>).

⁴ Федеральный закон от 31.07.2020 № 258-ФЗ (ред. от 31.07.2025) "Об экспериментальных правовых режимах в сфере цифровых и технологических инноваций в Российской Федерации" (ссылка: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45796>).

⁵ Федеральный закон от 24.04.2020 № 123-ФЗ (ред. от 08.08.2024) "О проведении эксперимента по установлению специального регулирования в целях

создания необходимых условий для разработки и внедрения технологий искусственного интеллекта в субъекте Российской Федерации - городе федерального значения Москве, об особенностях обработки персональных данных при формировании региональных составов данных и предоставления доступа к региональным составам данных и внесении изменений в статьи 6 и 10 Федерального закона "О персональных данных" (ссылка: <https://base.garant.ru/73945195/>).

⁶ Указ Президента Российской Федерации от 08.12.2025 № 896 "О Стратегии развития здравоохранения в Российской Федерации на период до 2030 года" (ссылка: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202512090003>).

поддержки принятия клинических решений с использованием технологий ИИ, развитие телемедицинских технологий, внедрение единой цифровой платформы управления здоровьем человека, обеспечение перехода на электронный документооборот с использованием интеллектуальных сервисов, а также расширение применения МИ с технологиями ИИ и цифровых сервисов. Таким образом, впервые на уровне документа стратегического планирования развитие технологий ИИ рассматривается в качестве одного из приоритетных направлений обеспечения технологического суверенитета и дальнейшей трансформации системы здравоохранения Российской Федерации.

Вместе с тем результаты проведенного анализа свидетельствуют об отсутствии в настоящее время специализированного федерального закона, комплексно регулирующего применение технологий ИИ в сфере охраны здоровья. Правовое регулирование осуществляется посредством положений законодательства об охране здоровья граждан, обращении лекарственных средств, МИ с технологиями ИИ, персональных данных и технического регулирования.

Существенное значение для правового обеспечения применения

технологий ИИ в интеллектуальном здравоохранении имеет Федеральный закон от 21 ноября 2011 г. № 323-ФЗ «Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации»⁷.

В соответствии со статьей 38 указанного закона к МИ относятся инструменты, аппараты, приборы, оборудование, материалы и иные изделия, применяемые в медицинских целях, включая специальное программное обеспечение, функциональное назначение которого не реализуется посредством фармакологического, иммунологического, генетического или метаболического воздействия на организм человека. Следовательно, программные решения, основанные на технологиях ИИ, при наличии соответствующего указания в технической документации производителя и прохождении процедуры государственной регистрации могут рассматриваться в качестве МИ и подлежат регуляторному контролю со стороны Росздравнадзора⁸.

Важную роль в развитии нормативного регулирования играют документы стандартизации и так называемого «мягкого права». К ним относятся «Кодекс этики применения ИИ в сфере охраны здоровья»⁹, предварительный национальный стандарт ПНСТ 961-2024 «Системы ИИ в

⁷ Федеральный закон от 21 ноября 2011 г. N 323-ФЗ "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями) <https://base.garant.ru/12191967/>

⁸ Подробная информация о зарегистрированных медицинских изделиях на основе технологий искусственного интеллекта размещается

Росздравнадзором в «Государственном реестре медицинских изделий и организаций (индивидуальных предпринимателей), осуществляющих производство и изготовление медицинских изделий» по адресу: www.roszdravnadzor.ru/services/misearch

⁹ Кодекс этики применения искусственного интеллекта в сфере охраны здоровья. Версия 2.1 (утв.

здравоохранении. Этические аспекты»¹⁰, а также ГОСТ Р 59921.6-2021¹¹, определяющий общие требования к применению технологий ИИ в клинической медицине.

Важным этапом дальнейшего развития отечественной модели регулирования стал проект федерального закона «Об основах государственного регулирования сфер применения технологий ИИ в Российской Федерации»¹². Законопроект предусматривает формирование единой системы государственного регулирования технологий ИИ, внедрение риск-ориентированного подхода к классификации ИИ-систем, определение правового статуса субъектов, участвующих в разработке, внедрении и эксплуатации интеллектуальных систем, а также разграничение полномочий органов государственной власти. Данный федеральный закон может стать важным этапом формирования комплексной нормативно-правовой модели регулирования ИИ, в том числе в медицине и фармацевтической отрасли.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что

международная практика постепенно смещается от преимущественно декларативных подходов к созданию комплексных регуляторных механизмов, учитывающих особенности жизненного цикла интеллектуальных систем и рассматривающих системы с технологиями ИИ в качестве объектов повышенного риска. В этом контексте отечественная модель регулирования развивается в русле общемировых тенденций, ориентированных на обеспечение безопасности пациентов, клинической эффективности и надлежащего государственного контроля за применением технологий ИИ в интеллектуальном здравоохранении.

Применение технологий ИИ в медицине

Результаты проведенного анализа показали, что современные технологии ИИ находят применение на различных этапах медицинской и фармацевтической деятельности – от разработки лекарственных препаратов и проведения клинических исследований до поддержки принятия

Межведомственной рабочей группой при Минздраве России по вопросам создания, развития и внедрения в клиническую практику медицинских изделий и сервисов с использованием технологий искусственного интеллекта, протокол от 14.02.2025 № 90/18-0/117) https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_501066/ (дата обращения 14.06.2026)

¹⁰ Предварительный национальный стандарт в здравоохранении. Системы искусственного интеллекта в здравоохранении. Этические аспекты. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального

агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 октября 2024 г. № 68-пнт.

¹¹ ГОСТ Р 59921.6-2021. Системы искусственного интеллекта в клинической медицине. Часть 6. Общие требования к эксплуатации. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Дата введения в действие: 01.03.2022.

¹² Проект Федерального закона "Об основах государственного регулирования сфер применения технологий искусственного интеллекта в Российской Федерации" (подготовлен Минцифры России 17.03.2026) <https://base.garant.ru/483411783/> (дата обращения 14.06.2026)

клинических решений и мониторинга безопасности фармакотерапии.

Международный опыт

В мировой практике наблюдается активное расширение применения технологий ИИ в здравоохранении. Наиболее значительные успехи в данной области достигнуты в странах с развитой научно-технологической, цифровой и медицинской инфраструктурой, где интеллектуальные технологии широко используются для анализа медицинских данных, диагностики заболеваний, мониторинга состояния пациентов и персонализации терапии.

Вместе с тем внедрение ИИ приобретает глобальный характер и постепенно охватывает все большее число стран, рассматривающих интеллектуальные технологии в качестве инструмента повышения качества, доступности и эффективности медицинской помощи [19].

Диагностика заболеваний

Одним из наиболее развитых направлений применения технологий ИИ в клинической медицине является диагностика заболеваний. Использование методов машинного и глубокого обучения позволяет анализировать большие массивы клинико-диагностических данных, способствуя повышению точности выявления патологических изменений и снижению вероятности диагностических ошибок [20].

Особое значение технологии ИИ приобрели в эндоскопической

диагностике, где алгоритмы глубокого обучения демонстрируют высокую эффективность при выявлении злокачественных новообразований желудка и колоректального рака, а также при оценке распространенности опухолевого процесса [21]. Кроме того, интеллектуальные модели используются для прогнозирования риска метастазирования и стратификации пациентов, что способствует выбору оптимальной лечебной тактики и повышению эффективности хирургического лечения [22].

Системы поддержки принятия клинических решений

Важным направлением применения технологий ИИ являются системы поддержки принятия клинических решений (*англ. Clinical Decision Support Systems, CDSS*), предназначенные для анализа клинических данных и оказания интеллектуальной помощи медицинским работникам. Подобные системы интегрируются с электронными медицинскими картами и способны формировать рекомендации по диагностике и лечению, способствуя повышению качества и безопасности медицинской помощи.

Особое значение системы поддержки принятия решений приобретают при ведении пациентов с коморбидной патологией, одновременно получающих несколько лекарственных препаратов. Использование алгоритмов ИИ позволяет автоматически сопоставлять лекарственные назначения, выявлять потенциально опасные

межлекарственные взаимодействия, противопоказания, дублирование терапии, несоответствие дозировок и предупреждать о риске развития нежелательных лекарственных реакций. Подобные возможности способствуют оптимизации фармакотерапии, снижению частоты медикаментозных ошибок и повышению безопасности лечения. Вместе с тем ИИ рассматривается не как замена врача, а как инструмент, расширяющий возможности специалиста и обеспечивающий дополнительную поддержку при принятии клинических решений [23].

Генеративный ИИ и большие языковые модели в медицине

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений современного ИИ является генеративный ИИ и основанные на архитектуре трансформеров большие языковые модели (англ. *Large Language Models, LLM*). В отличие от традиционных алгоритмов машинного обучения, ориентированных преимущественно на выполнение узкоспециализированных задач, генеративные модели способны создавать новый контент, обрабатывать естественный язык и выполнять широкий спектр когнитивных функций, включая анализ, обобщение и интерпретацию информации. В последние годы большие языковые модели становятся важным компонентом интеллектуального здравоохранения, обеспечивая новые возможности для автоматизации работы с медицинскими данными

и поддержки профессиональной деятельности медицинских работников [24].

В настоящее время генеративный ИИ применяется для интеллектуальной поддержки принятия клинических решений, автоматизации ведения медицинской документации, анализа научной литературы, подготовки клинических заключений, персонализированного взаимодействия с пациентами, а также в образовательных и исследовательских целях. Одновременно использование больших языковых моделей сопровождается рядом ограничений, связанных с риском генерации недостоверной информации («галлюцинаций»), алгоритмической предвзятостью, вопросами конфиденциальности медицинских данных и необходимостью обеспечения надежности и интерпретируемости получаемых результатов [25]. В связи с этим генеративный ИИ рассматривается не как замена специалиста, а как перспективный инструмент расширения возможностей медицинских и фармацевтических работников, потенциал которого требует дальнейшей научной и регуляторной оценки.

ИИ в хирургии

Перспективным направлением применения технологий ИИ является хирургия. Использование интеллектуальных алгоритмов способствует повышению точности диагностики, стандартизации хирургических подходов и совершенствованию процессов принятия решений на различных

этапах хирургического лечения. По мере накопления клинических данных и развития методов машинного обучения формируется концепция интеллектуальной хирургии, ориентированная на повышение безопасности и эффективности хирургических вмешательств [26].

Прогнозирование периоперационных рисков

Важным направлением применения ИИ является прогнозирование периоперационных рисков и послеоперационных осложнений. В отличие от традиционных шкал оценки, современные модели машинного обучения позволяют осуществлять более точную стратификацию пациентов и повышать объективность прогнозирования. Использование подобных систем способствует персонализации хирургической тактики и оптимизации периоперационного ведения пациентов [27, 28].

Интраоперационная поддержка принятия решений

Развитие технологий компьютерного зрения и глубокого обучения создает новые возможности для интеллектуальной поддержки хирургических вмешательств. Современные системы способны анализировать интраоперационные видеоданные, распознавать этапы операции, идентифицировать анатомические ориентиры и потенциально опасные зоны, что

способствует снижению риска интраоперационных ошибок и повышению безопасности хирургического лечения [29].

Российская Федерация

По данным Государственного реестра МИ Федеральной службы по надзору в сфере здравоохранения по состоянию на 28.06.2026 в Российской Федерации¹³ зарегистрировано 57 МИ, функционирование которых основано на применении технологий ИИ. Основные направления использования указанных решений представлены на рисунке 2.

Анализ структуры зарегистрированных МИ свидетельствует о выраженной концентрации решений в области обработки и интерпретации медицинских изображений. Данное направление является доминирующим и включает 40 зарегистрированных изделий (70,2 % от общего числа), среди которых преобладают системы анализа радиологических изображений (n = 34). В значительно меньшей степени представлены решения для обработки иных видов изображений (n = 5) и ультразвуковых исследований (n = 1).

Вторым по распространенности направлением является анализ клинико-диагностических данных, на долю которого приходится 9 МИ (15,8 %). В данной группе преобладают системы, предназначенные для

¹³ Сведения из Государственного реестра медицинских изделий и организаций (индивидуальных предпринимателей), осуществляющих производство и

изготовление медицинских изделий доступны по ссылке: <https://elk.roszdravnadzor.gov.ru/widget/>

обработки данных электронных медицинских карт ($n = 8$), тогда как отдельную категорию составляют решения,

ориентированные на анализ лекарственной терапии ($n = 1$).



Рисунок 2. Направления применения медицинских изделий с технологиями искусственного интеллекта в Российской Федерации

Figure 2. Areas of application of medical devices with artificial intelligence technologies in the Russian Federation

Направление, связанное с обработкой физиологических сигналов и видеопотока, представлено шестью МИ (10,5 %), включая системы анализа цифровых электрокардиограмм ($n = 3$) и решения для обработки видеоданных ($n = 3$). Кроме того, в Государственном реестре зарегистрированы 2 МИ, предназначенные для клинического планирования и прогнозирования, в частности для поддержки принятия решений при оказании стационарной помощи и планировании хирургических вмешательств. При этом сегмент интеллектуальной поддержки

фармакотерапии представлен лишь одним зарегистрированным МИ, что свидетельствует о сравнительно ограниченном распространении соответствующих технологий в отечественной практике.

В целом структура зарегистрированных в Российской Федерации МИ с технологиями ИИ свидетельствует о доминировании диагностических сценариев их применения и преимущественной ориентации отечественного рынка на автоматизацию процессов анализа медицинских изображений. Ограниченная представленность

решений, предназначенных для поддержки управления фармакотерапией, клинического прогнозирования и принятия клинических решений, позволяет констатировать, что потенциал применения технологий ИИ в указанных областях реализован в значительно меньшей степени. Полученные данные показывают, что в отечественной практике применение ИИ преимущественно сосредоточено в диагностическом контуре, тогда как фармацевтические сценарии интеллектуализации представлены значительно менее полно. Это обуславливает необходимость отдельного рассмотрения потенциала ИИ в фармацевтической отрасли.

Применение технологий ИИ в фармацевтической отрасли

В отличие от отечественной практики, где применение технологий ИИ в фармацевтическом сегменте пока представлено ограниченным числом решений, мировая фармацевтическая индустрия демонстрирует тенденцию к последовательному расширению сфер использования интеллектуальных технологий. В настоящее время ИИ рассматривается в качестве одного из ключевых факторов технологической трансформации фармацевтической отрасли, обеспечивающего повышение эффективности процессов разработки, производства и сопровождения лекарственных препаратов.

Международный опыт

Проведенный анализ свидетельствует о том, что в международной практике технологии ИИ активно применяются для моделирования молекулярных структур, прогнозирования фармакокинетических и фармакодинамических свойств лекарственных веществ, репозиционирования лекарственных препаратов, обработки результатов клинических исследований, а также оценки эффективности и безопасности фармакотерапии. Использование методов машинного обучения и глубокого обучения способствует существенному сокращению временных и экономических затрат на разработку новых лекарственных препаратов, повышению эффективности фармацевтических исследований и оптимизации процессов принятия решений на различных стадиях жизненного цикла лекарственных средств.

На данный момент современная фармация основывается на широком спектре алгоритмических подходов, включающих генеративные модели, рекуррентные и сверточные нейронные сети, графовые нейронные сети, методы обучения с подкреплением, байесовские модели, автокодировщики и трансформерные архитектуры. Наиболее перспективными направлениями в настоящее время рассматриваются генеративные модели, графовые нейронные сети и трансформерные архитектуры, обеспечивающие возможность работы со сложными молекулярными

структурами и большими массивами биомедицинских данных.

Основные модели ИИ и области их применения в фармации представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные модели искусственного интеллекта и области их применения в интеллектуальной фармации

Table 1. Main artificial intelligence models and their areas of application in intelligent pharmacy

Модель ИИ / AI model	Основные области применения в фармации / Main areas of application in pharmacy
Генеративно-сопоставительные сети / Generative adversarial networks (GANs)	Генерация новых химических соединений, de novo-дизайн лекарственных препаратов и оптимизация их структурно-функциональных характеристик посредством взаимодействия генеративной и дискриминаторной нейронных сетей [30]. Generation of new chemical compounds, de novo drug design, and optimisation of their structural and functional characteristics through the interaction of generative and discriminative neural networks [30].
Рекуррентные нейронные сети / Recurrent neural networks (RNNs)	Анализ последовательностей ДНК и белков, исследование пространственной организации белковых структур, выявление закономерностей в биологических последовательностях [31]. Analysis of DNA and protein sequences, investigation of the spatial organisation of protein structures, and identification of patterns in biological sequences [31].
Свёрточные нейронные сети / Convolutional neural networks (CNNs)	Анализ молекулярных структур, идентификация терапевтических мишеней, распознавание структурных особенностей биологических объектов [32]. Analysis of molecular structures, identification of therapeutic targets, and recognition of structural features of biological objects [32].
Сети с долгой краткосрочной памятью / Long short-term memory networks (LSTMs)	Моделирование временных зависимостей, прогнозирование фармакокинетических и фармакодинамических параметров, анализ данных ADME-исследований [33]. Modelling of temporal dependencies, prediction of pharmacokinetic and pharmacodynamic parameters, and analysis of ADME study data [33].
Графовые нейронные сети / Graph neural networks (GNNs)	Представление молекул в виде графовых структур, прогнозирование свойств соединений, виртуальный скрининг и поиск новых лекарственных препаратов [34]. Representation of molecules as graph structures, prediction of compound properties, virtual screening, and discovery of new drug candidates [34].
Методы обучения с подкреплением / Reinforcement learning (RL)	Оптимизация схем дозирования, разработка персонализированных терапевтических стратегий, адаптивное управление фармакотерапией [35]. Optimisation of dosing regimens, development of personalised therapeutic strategies, and adaptive management of pharmacotherapy [35].

Глубокие Q-сети / Deep Q-networks (DQNs)	Прогнозирование химической активности соединений, оптимизация процессов разработки лекарственных препаратов, отбор перспективных молекулярных кандидатов [36, 37]. Prediction of chemical activity of compounds, optimisation of drug development processes, and selection of promising molecular candidates [36, 37].
Байесовские модели / Bayesian models	Количественная оценка неопределенности, вероятностное моделирование, оценка рисков и оптимизация экспериментальных исследований [38, 39]. Quantitative assessment of uncertainty, probabilistic modelling, risk assessment, and optimisation of experimental studies [38, 39].
Автокодировщики / Autoencoders	Снижение размерности данных, выделение ключевых молекулярных характеристик, комбинаторный скрининг и моделирование свойств химических соединений [40]. Dimensionality reduction, extraction of key molecular features, combinatorial screening, and modelling of chemical compound properties [40].
Трансформерные архитектуры / Transformer architectures	Трансформерные архитектуры применяются для обработки естественного языка и интеллектуального анализа неструктурированных биомедицинских данных. Модели данного класса, включая BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), обеспечивают извлечение значимой информации из научной литературы, патентных баз данных и результатов клинических исследований, способствуя принятию обоснованных решений в области разработки и оценки лекарственных препаратов [41, 42]. Transformer architectures are used for natural language processing and intelligent analysis of unstructured biomedical data. Models of this class, including BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers), enable the extraction of meaningful information from scientific literature, patent databases, and clinical trial results, thereby supporting evidence-informed decision-making in drug development and evaluation [41, 42].

III в разработке лекарственных препаратов

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений интеллектуальной фармации является использование технологий ИИ в процессах поиска и разработки новых лекарственных препаратов. Развитие методов машинного обучения, глубокого обучения и генеративного ИИ

обусловило качественную трансформацию традиционной модели разработки лекарственных средств, обеспечив переход от преимущественно эмпирических подходов к дата-ориентированным стратегиям рационального дизайна. Основные направления применения ИИ в процессе разработки лекарственных препаратов представлены на рисунке 3.

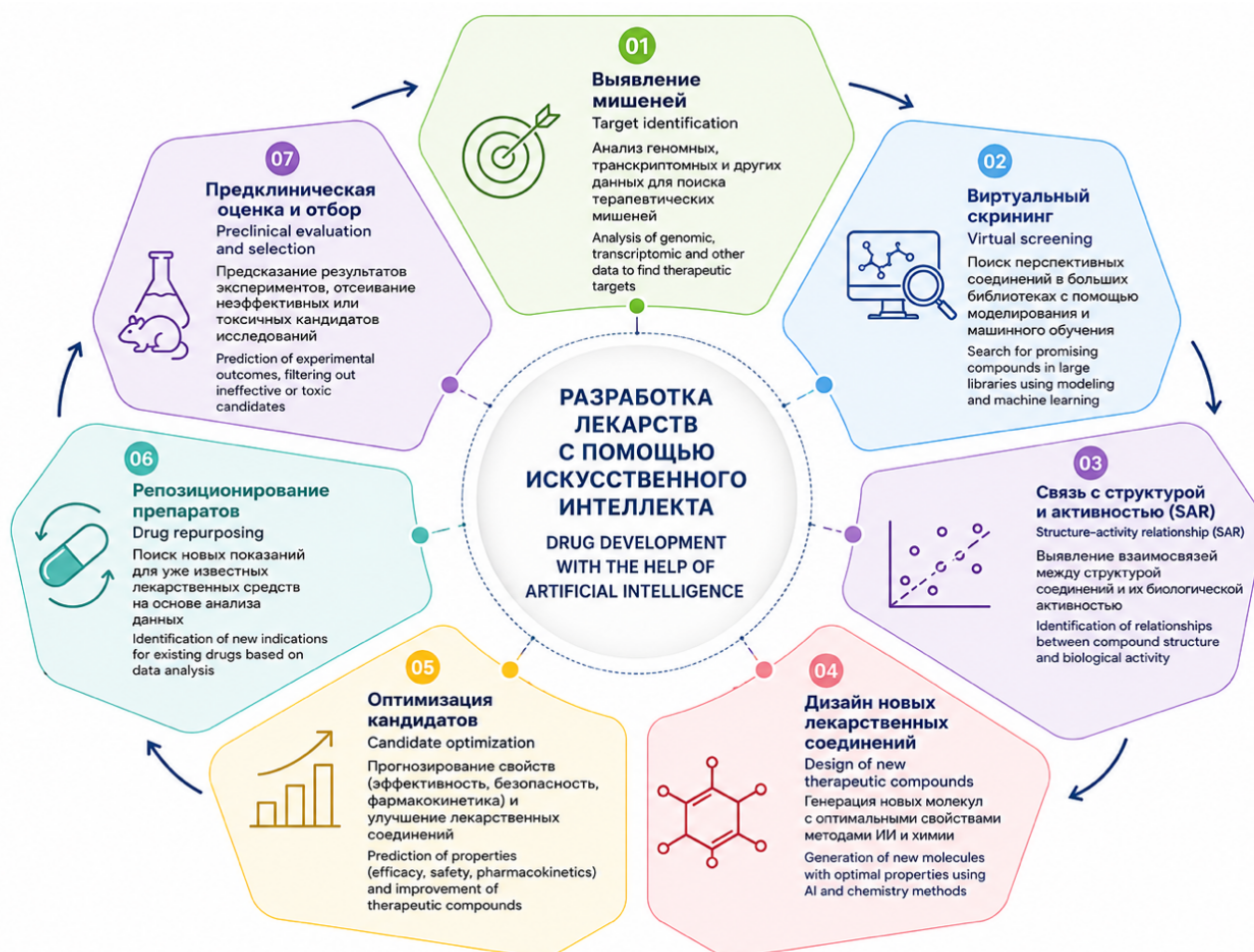


Рисунок 3. Основные направления применения искусственного интеллекта в разработке лекарственных препаратов

Figure 3. Main areas of artificial intelligence application in drug development

Идентификация терапевтических мишеней

Одним из первоначальных этапов создания лекарственных препаратов является определение перспективных биологических мишеней, ассоциированных с развитием патологических процессов. В настоящее время системы ИИ обеспечивают возможность комплексного анализа геномных, транскриптомных, протеомных, структурных и функциональных данных, способствуя выявлению молекулярных механизмов заболеваний и установлению взаимосвязей между клеточными сигнальными путями и

клиническими фенотипами. Подобные подходы открывают дополнительные возможности для разработки препаратов, модифицирующих течение заболеваний, и формирования принципиально новых терапевтических стратегий [43].

Виртуальный скрининг и молекулярное моделирование

Существенное значение в современной фармацевтической разработке приобретают методы виртуального скрининга, основанные на использовании алгоритмов ИИ. Применение интеллектуальных систем позволяет осуществлять

высокопроизводительный анализ обширных библиотек химических соединений с целью выявления молекул, обладающих потенциальной способностью взаимодействовать с конкретными рецепторами или функциональными доменами. Кроме того, методы ИИ обеспечивают прогнозирование участков связывания, моделирование межмолекулярных взаимодействий и оценку аффинности соединений, что способствует существенному сокращению временных и ресурсных затрат на поиск перспективных кандидатов для последующих экспериментальных исследований [44].

Моделирование взаимосвязи между структурой и биологической активностью соединений

Важное место в интеллектуальной разработке лекарственных препаратов занимают модели количественной взаимосвязи между химической структурой и биологической активностью соединений (англ. *Structure–Activity Relationship, SAR*). Использование методов машинного обучения позволяет выявлять сложные нелинейные закономерности, определяющие фармакологические свойства молекул, и прогнозировать их терапевтический потенциал. Это обеспечивает возможность целенаправленной оптимизации химических соединений, повышения их селективности, улучшения фармакокинетических характеристик и увеличения терапевтической эффективности [45].

Генеративный дизайн новых лекарственных соединений

Современные генеративные модели и алгоритмы машинного обучения существенно расширяют возможности *de novo*-дизайна лекарственных препаратов. Обучаясь на массивах химических структур и экспериментальных данных, интеллектуальные системы способны генерировать ранее неизвестные молекулярные конфигурации, обладающие свойствами потенциальных лекарственных соединений. Тем самым ИИ способствует расширению доступного химического пространства и ускорению процессов создания инновационных лекарственных препаратов [46].

Оптимизация и совершенствование молекулярных кандидатов

После идентификации перспективных соединений технологии ИИ используются для их дальнейшей оптимизации. Современные алгоритмические модели позволяют прогнозировать фармакокинетические характеристики, токсикологические свойства, параметры безопасности и терапевтической эффективности потенциальных лекарственных средств. Комплексный анализ указанных параметров обеспечивает возможность раннего выявления нежелательных свойств молекул и способствует повышению вероятности успешного прохождения последующих этапов разработки.

Репозиционирование лекарственных препаратов

Отдельным направлением применения технологий ИИ является репозиционирование лекарственных препаратов, предусматривающее поиск новых терапевтических показаний для уже существующих лекарственных средств. Анализ многомерных биомедицинских данных, включающих сведения о молекулярных механизмах заболеваний, фармакологических эффектах и результатах клинических исследований, позволяет выявлять ранее неизвестные области применения зарегистрированных препаратов. Использование подобных подходов способствует существенному сокращению сроков разработки новых методов лечения, снижению экономических затрат и повышению эффективности трансляции результатов фундаментальных исследований в клиническую практику [47].

Прогнозирование токсикологических свойств и механизмов действия лекарственных соединений

Важным направлением применения технологий ИИ в интеллектуальной фармации является прогнозирование токсикологических свойств и механизмов действия потенциальных лекарственных соединений. Современные алгоритмы машинного обучения обеспечивают возможность комплексного анализа молекулярных структур, фармакокинетических параметров и токсикологических характеристик, способствуя раннему выявлению соединений с неблагоприятным профилем безопасности. Использование

подобных подходов позволяет снизить вероятность развития нежелательных реакций на этапах доклинических и клинических исследований, повысить эффективность отбора перспективных молекулярных кандидатов и оптимизировать процессы разработки лекарственных препаратов [48].

Существенное значение в современной фармацевтической разработке приобретают методы вычислительной идентификации биологических мишеней (*англ. Target Fishing*), основанные на интеграции технологий ИИ, хемоинформатики, молекулярного моделирования и молекулярного докинга. Данные подходы позволяют прогнозировать фармакологические свойства и потенциальные побочные эффекты соединений, устанавливать взаимосвязи между химической структурой и молекулярными мишенями, а также выявлять новые терапевтические возможности известных лекарственных препаратов. Эффективность методов *Target Fishing* была продемонстрирована при исследовании механизмов действия ряда лекарственных средств, включая метадон, лоперамид и эметин [49]. В целом интеграция технологий ИИ и вычислительных методов моделирования способствует повышению эффективности и результативности процессов разработки лекарственных препаратов, сокращению временных и экономических затрат, а также совершенствованию оценки безопасности и терапевтического

потенциала новых соединений [50]. Основные направления применения технологий ИИ в процессах

разработки лекарственных препаратов представлены на рисунке 4.



Рисунок 4. Концептуальная схема применения технологий искусственного интеллекта в интеллектуальной фармации

Figure 4. Conceptual scheme of artificial intelligence technology application in intelligent pharmacy

В настоящее время в фармацевтических исследованиях сформировалась разветвленная экосистема специализированных вычислительных инструментов, основанных на методах ИИ, машинного обучения, хемоинформатики и молекулярного моделирования. Указанные программные решения применяются на различных этапах разработки лекарственных препаратов, включая автоматизацию

химического синтеза, виртуальный скрининг, прогнозирование биологической активности и токсичности соединений, оценку белок-лигандных взаимодействий, генеративный дизайн новых молекул и моделирование пространственной структуры белков. Наиболее значимые инструменты ИИ, используемые при разработке лекарственных препаратов, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Инструменты искусственного интеллекта, используемые при разработке лекарственных препаратов, по состоянию на январь 2025 г.

Table 2. Artificial intelligence tools used in drug development as of January 2025

Инструмент / Tool	Основное функциональное назначение / Main functional purpose
Chemputer	Автоматизированная платформа для формализованного описания, документирования и воспроизведения процессов химического синтеза. Automated platform for the formalised description, documentation, and reproduction of chemical synthesis processes.
ODDT	Открытый инструментарий для молекулярного моделирования, виртуального скрининга, докинга и хемоинформатического анализа. Open-source toolkit for molecular modelling, virtual screening, docking, and cheminformatics analysis.
ORGANIC	Генеративная система для синтеза и проектирования органических молекул с заданными структурными и функциональными характеристиками. Generative system for the synthesis and design of organic molecules with specified structural and functional characteristics.
DeepChem	Python-ориентированная платформа глубокого обучения для моделирования молекулярных свойств, прогнозирования активности соединений и поддержки процессов открытия лекарственных средств. Python-based deep learning platform for modelling molecular properties, predicting compound activity, and supporting drug discovery processes.
DeepNeuralNet-QSAR	Нейросетевой инструмент для построения моделей «количественная связь структура – активность» и выдвижения гипотез о биологической активности химических соединений. Neural network tool for building quantitative structure–activity relationship models and generating hypotheses about the biological activity of chemical compounds.
Neural Graph Fingerprints	Подход на основе графовых нейронных представлений для прогнозирования свойств новых химических соединений. Graph neural representation-based approach for predicting the properties of new chemical compounds.
Hit Dexter	Система прогнозирования соединений, способных демонстрировать активность в биологических экспериментах, с использованием алгоритмов машинного обучения. System for predicting compounds likely to show activity in biological experiments using machine learning algorithms.
DeepTox	Инструмент для прогнозирования токсичности, биосовместимости и потенциального неблагоприятного профиля безопасности химических соединений. Tool for predicting toxicity, biocompatibility, and the potential adverse safety profile of chemical compounds.
PotentialNet	Графовая сверточная модель для прогнозирования белок-лигандного связывания и оценки межмолекулярных взаимодействий.

	Graph convolutional model for predicting protein–ligand binding and assessing intermolecular interactions.
REINVENT	Генеративная нейросетевая платформа для de novo-дизайна молекул и оптимизации структур лекарственных кандидатов. Generative neural network platform for de novo molecular design and optimisation of drug candidate structures.
DeltaVina	Оценочная функция для прогнозирования и уточнения аффинности связывания белок-лигандных комплексов. Scoring function for predicting and refining the binding affinity of protein–ligand complexes.
AlphaFold	Система глубокого обучения для высокоточного прогнозирования трёхмерной структуры белков и анализа структурных предпосылок лекарственного взаимодействия. Deep learning system for highly accurate prediction of three-dimensional protein structure and analysis of structural prerequisites for drug interactions.

Представленные инструменты демонстрируют, что применение ИИ в фармацевтической разработке уже не ограничивается отдельными задачами молекулярного прогнозирования, а формирует целостную вычислительную инфраструктуру интеллектуальной фармации [51]. Ее развитие обеспечивает переход от фрагментарного использования алгоритмических моделей к комплексной цифровой поддержке процессов поиска, оптимизации и доклинической оценки лекарственных соединений.

Российская Федерация

В Российской Федерации единственное зарегистрированное МИ с технологиями ИИ, предназначенное для анализа лекарственной терапии, обладает широким спектром функциональных возможностей, включая оценку безопасности фармакотерапии, выявление потенциальных межлекарственных взаимодействий и противопоказаний, проверку

соответствия лекарственных назначений действующим клиническим рекомендациям и стандартам медицинской помощи, анализ соответствия назначений данным Государственного реестра лекарственных средств, поддержку принятия клинических решений, проведение фармакоэкономического анализа и формирование электронных рецептов. Указанные функциональные характеристики отражают процессы конвергенции клинических и фармацевтических компонентов интеллектуального здравоохранения.

Перспективы развития интеллектуального здравоохранения

Результаты проведенного анализа свидетельствуют о том, что дальнейшая эволюция интеллектуального здравоохранения будет определяться углублением конвергенции технологий ИИ, больших данных,

мультиомных исследований, облачных вычислений, Интернета медицинских вещей и цифровых платформ. Совокупность указанных технологических решений формирует предпосылки для перехода от фрагментарного внедрения отдельных интеллектуальных систем к созданию единой дата-центрированной экосистемы, обеспечивающей непрерывное управление здоровьем человека на протяжении всего жизненного цикла.

Одной из ключевых тенденций является развитие мультимодальных систем ИИ, способных осуществлять комплексный анализ медицинских изображений, электронных медицинских карт, результатов лабораторных исследований, геномных данных и физиологических сигналов. Интеграция разнородных источников информации создает предпосылки для повышения точности диагностики, совершенствования клинического прогнозирования и дальнейшего развития персонализированной медицины. Существенную роль в трансформации медицинской практики также будут играть генеративный ИИ и большие языковые модели, расширяющие возможности интеллектуальной поддержки принятия клинических решений, автоматизации медицинской документации и обработки научной информации.

Перспективным направлением развития интеллектуального здравоохранения является внедрение технологий цифровых двойников,

предусматривающих создание виртуальных моделей органов, биологических систем и отдельных пациентов. Использование подобных подходов может способствовать совершенствованию прогнозирования течения заболеваний, моделированию различных сценариев лечения, оптимизации фармакотерапии и развитию концепции прецизионной медицины. Дополнительные возможности связаны с применением методов федеративного обучения, обеспечивающих совместное использование распределенных медицинских данных без необходимости их централизованного хранения, что имеет принципиальное значение в условиях возрастающих требований к защите персональных данных.

Важнейшим фактором дальнейшего развития интеллектуального здравоохранения становится достижение технологического лидерства, рассматриваемого в качестве одного из приоритетов государственной политики в области научно-технологического развития. В этих условиях технологии ИИ приобретают стратегическое значение для обеспечения конкурентоспособности национальных систем здравоохранения, повышения доступности и качества медицинской помощи, а также формирования новых высокотехнологичных сегментов биомедицинской индустрии. Развитие интеллектуального здравоохранения следует рассматривать не только как направление цифровой

трансформации отрасли, но и как один из инструментов обеспечения технологического суверенитета государства.

Для Российской Федерации особую актуальность приобретает ускоренное внедрение технологий ИИ в практическую медицину и фармацевтическую отрасль. Несмотря на существенные достижения в области интеллектуального анализа медицинских изображений и развития цифровой инфраструктуры, потенциал применения ИИ в сфере разработки лекарственных препаратов, фармаконадзора, клинических исследований, управления фармакотерапией и персонализированной медицины в настоящее время реализован в недостаточной степени. В отличие от мировой практики, характеризующейся активной интеграцией интеллектуальных технологий на всех этапах жизненного цикла лекарственных средств, отечественный фармацевтический сектор пока находится на этапе формирования соответствующей технологической базы.

В этой связи дальнейшее развитие ИИ в фармации должно рассматриваться в качестве одного из приоритетных направлений обеспечения технологического лидерства Российской Федерации. Расширение применения интеллектуальных технологий в процессах поиска новых молекулярных соединений, моделирования фармакологических свойств, проведения доклинических и клинических

исследований, фармаконадзора и сопровождения лекарственной терапии способно способствовать сокращению сроков разработки лекарственных препаратов, повышению эффективности фармацевтических исследований и укреплению научно-технологической независимости страны.

Наряду с технологическими и организационными аспектами важнейшим условием успешной интеграции технологий ИИ в систему интеллектуального здравоохранения является развитие цифровой грамотности и формирование новых профессиональных компетенций медицинских и фармацевтических работников. Возрастающая сложность интеллектуальных систем требует от специалистов не только владения традиционными клиническими и фармацевтическими знаниями, но и понимания принципов функционирования алгоритмов ИИ, особенностей интерпретации результатов их работы, а также навыков безопасного и этически обоснованного использования цифровых технологий. В этой связи совершенствование образовательных программ, внедрение элементов цифровой медицины и интеллектуальной фармации в систему непрерывного профессионального образования, а также формирование культуры ответственного взаимодействия с интеллектуальными технологиями приобретают стратегическое значение для подготовки кадров, способных эффективно

функционировать в условиях цифровой трансформации здравоохранения.

Вместе с тем реализация потенциала интеллектуального здравоохранения потребует дальнейшего совершенствования нормативно-правовых механизмов регулирования, разработки единых стандартов качества и безопасности алгоритмических систем, обеспечения интерпретируемости моделей и повышения уровня доверия со стороны профессионального сообщества и пациентов. В этих условиях ИИ следует рассматривать не как альтернативу специалисту, а как инструмент расширения его профессиональных возможностей, обеспечивающий качественно новый уровень организации медицинской помощи и фармацевтической деятельности.

Преимущества и ограничения технологий ИИ в медицине и фармации

Стремительное распространение технологий ИИ в медицине и фармацевтической отрасли обусловлено рядом преимуществ и недостатков, способствующих повышению эффективности исследовательских, клинических и организационных процессов [52, 53].

Технологические преимущества

1. *Снижение влияния человеческого фактора и повышение точности принимаемых решений.* Использование алгоритмов ИИ позволяет минимизировать вероятность ошибок, связанных с субъективностью и

ограниченными когнитивными возможностями человека, обеспечивая более высокую точность анализа и воспроизводимость результатов.

2. *Автоматизация рутинных и ресурсоемких процессов.* Интеллектуальные системы способны выполнять повторяющиеся операции в непрерывном режиме, одновременно обрабатывая значительные объемы информации, что способствует повышению производительности и оптимизации использования трудовых ресурсов.

3. *Ускорение процессов разработки лекарственных препаратов и технологических инноваций.* Применение методов машинного обучения, глубокого обучения и вычислительного моделирования обеспечивает сокращение временных и экономических затрат на поиск новых молекулярных соединений, оптимизацию лекарственных форм и совершенствование систем доставки лекарственных средств.

4. *Расширение возможностей клинической практики и персонализированной медицины.* Технологии ИИ используются для анализа медицинских данных, прогнозирования рисков, выявления нежелательных реакций и поддержки принятия клинических решений, способствуя повышению качества и безопасности медицинской помощи.

5. *Развитие медицинского образования и симуляционных технологий.* Интеллектуальные системы и цифровые симуляторы позволяют

совершенствовать профессиональные компетенции специалистов и повышать эффективность подготовки медицинских кадров.

6. *Обеспечение непрерывности функционирования и круглосуточной поддержки.* В отличие от человека, интеллектуальные системы способны функционировать в непрерывном режиме, что имеет особое значение для процессов мониторинга, обработки данных и поддержки пользователей.

7. *Использование цифровых ассистентов и интеллектуальных сервисов.* Технологии ИИ обеспечивают информационную и консультативную поддержку пациентов, медицинских работников и исследователей, способствуя повышению доступности медицинских и образовательных ресурсов.

8. *Выполнение задач в условиях повышенного риска и ограниченной доступности.* Применение интеллектуальных систем позволяет снизить степень воздействия опасных факторов на человека и расширяет возможности выполнения отдельных видов деятельности в сложных или неблагоприятных условиях.

Совокупность указанных преимуществ позволяет рассматривать технологии ИИ в качестве одного из ключевых факторов цифровой трансформации медицины и фармацевтической отрасли, обеспечивающего повышение эффективности научных исследований, совершенствование клинической практики и ускорение процессов

разработки инновационных лекарственных препаратов.

Ограничения и риски

1. *Высокие затраты на разработку и внедрение.* Создание, обучение и поддержка интеллектуальных систем требуют значительных финансовых ресурсов. Существенные затраты связаны с формированием вычислительной инфраструктуры, приобретением специализированного оборудования, обновлением программного обеспечения, а также необходимостью проведения постоянной валидации и сопровождения алгоритмических моделей.

2. *Ограниченная способность к воспроизведению человеческих когнитивных и эмоциональных функций.* Несмотря на высокую вычислительную производительность, современные системы ИИ не обладают эмоциональным интеллектом, интуицией, эмпатией и контекстным восприятием, присущими человеку. Вследствие этого интеллектуальные системы не способны в полной мере заменить клиническое мышление, профессиональный опыт и межличностное взаимодействие, имеющие принципиальное значение в медицинской практике.

3. *Зависимость качества результатов от обучающих данных.* Эффективность функционирования алгоритмов ИИ определяется качеством, полнотой и репрезентативностью используемых данных. Наличие систематических смещений,

недостаточной репрезентативности выборок или ошибок в исходных данных может приводить к снижению точности моделей и возникновению алгоритмической предвзятости.

4. *Ограниченная способность к генерации принципиально новых знаний.* Современные интеллектуальные системы функционируют в рамках заложенных алгоритмов и обучающих наборов данных, вследствие чего их возможности по формированию оригинальных идей и нестандартных решений остаются ограниченными по сравнению с творческим и ассоциативным мышлением человека.

5. *Необходимость постоянного обновления и технического сопровождения.* Поддержание работоспособности интеллектуальных систем требует регулярной модернизации программного обеспечения, адаптации моделей к новым данным и проведения повторной валидации, что сопровождается дополнительными временными и экономическими затратами.

6. *Риск структурных изменений рынка труда.* Автоматизация отдельных процессов и широкое внедрение интеллектуальных технологий могут приводить к трансформации профессиональной структуры занятости, изменению функциональных обязанностей специалистов и необходимости формирования новых цифровых компетенций. В долгосрочной перспективе это может сопровождаться сокращением потребности в отдельных

категориях работников и перераспределением трудовых ресурсов.

7. *Этические, правовые и регуляторные вызовы.* Использование технологий ИИ сопровождается возникновением вопросов, связанных с обеспечением конфиденциальности персональных данных, распределением юридической ответственности, интерпретируемостью алгоритмов и необходимостью разработки эффективных механизмов нормативно-правового регулирования.

Несмотря на значительные преимущества, применение технологий ИИ сопряжено с рядом ограничений, требующих комплексного междисциплинарного подхода к их преодолению. Минимизация указанных рисков представляет собой одно из ключевых условий безопасной и эффективной интеграции интеллектуальных технологий в медицину и фармацевтическую отрасль.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что технологии ИИ являются одним из ключевых факторов цифровой трансформации современной медицины и фармацевтической отрасли. Интеграция методов машинного обучения, глубокого обучения, генеративного ИИ и интеллектуального анализа данных способствует формированию новой парадигмы интеллектуального здравоохранения, основанной на конвергенции биомедицинских наук,

цифровых технологий и данных, а также создает предпосылки для повышения эффективности, доступности и качества оказания медицинской помощи.

Интеллектуальное здравоохранение XXI века представляет собой новую организационно-технологическую модель развития системы охраны здоровья, в рамках которой технологии ИИ выступают не только инструментом автоматизации отдельных процессов, но и одним из стратегических ресурсов, определяющих траекторию дальнейшего научно-технологического развития медицины и фармации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Big hopes for big data. *Nat Med.* 2020;26(1):1. doi: 10.1038/s41591-019-0740-8.
2. Rose C, Chen JH. Learning from the EHR to implement AI in healthcare. *NPJ Digit Med.* 2024;7:330. doi: 10.1038/s41746-024-01340-0.
3. Jackson VE, Wu Y, Bonelli R, Owen JP, Scott LW, Farashi S, et al. Multi-omic spatial effects on high-resolution AI-derived retinal thickness. *Nat Commun.* 2025;16:1317. doi: 10.1038/s41467-024-55635-7.
4. Sempionatto JR, Lasalde-Ramírez JA, Mahato K, Wang J, Gao W. Wearable chemical sensors for biomarker discovery in the omics era. *Nat Rev Chem.* 2022;6:899-915. doi: 10.1038/s41570-022-00439-w.
5. Acosta JN, Falcone GJ, Rajpurkar P, Topol EJ. Multimodal biomedical AI. *Nat Med.* 2022;28:1773-84. doi: 10.1038/s41591-022-01981-2.
6. Bhattamisra SK, Banerjee P, Gupta P, Mayuren J, Patra S, Candasamy M. Artificial intelligence in pharmaceutical and healthcare research. *Big Data Cogn Comput.* 2023;7(1):10. doi: 10.3390/bdcc7010010.
7. Mukhamediev RI, Popova Y, Kuchin Y, Zaitseva E, Kalimoldayev A, Symagulov A, et al. Review of artificial intelligence and machine learning technologies: classification, restrictions, opportunities and challenges. *Mathematics.* 2022;10:2552. doi: 10.3390/math10152552.
8. Вошев ДВ, Шепель РН, Вошева НА, Драпкина ОМ. Искусственный интеллект в здравоохранении: исторический путь, вызовы и перспективы (1960-2025 гг.). Первичная медико-санитарная помощь. 2025;2(3):35-47. doi: 10.15829/3034-4123-2025-72.
9. Kolluri S, Lin J, Liu R, Zhang Y, Zhang W. Machine learning and artificial intelligence in pharmaceutical research and development: a review. *AAPS J.* 2022;24(1):19. doi: 10.1208/s12248-021-00644-3.
10. Culyer AJ, Newhouse JP, editors. *Handbook of health economics.* Amsterdam: Elsevier; 2000.
11. Огарок МА. Искусственный интеллект в судебном толковании права. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: История и право. 2025;15(4):88-104. doi:

10.21869/2223-1501-2025-15-4-88-104.

12. Зайцева ТН, Бараксанова КМ. Анализ рисков информационной безопасности в центрах медицинской реабилитации: проблемы и перспективы. Обзор. Вестник восстановительной медицины. 2025;24(1):112-19. doi: 10.38025/2078-1962-2025-24-1-112-19.

13. Федотов Н. Отдельные аспекты защиты врачебной тайны при использовании телемедицинских технологий в здравоохранении. Сравнительное конституционное обозрение. 2024;33(1):40-59.

14. Медведев АИ. Правовые аспекты искусственного интеллекта и смежных технологий. Журнал Суда по интеллектуальным правам. 2022;(4):48-63. doi: 10.58741/23134852_2022_4_48.

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. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations and Directives (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union [Internet]. 2024 [cited 2026 Jul 20]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>.

17. Serrano DR, Luciano FC, Anaya BJ, Ongoren B, Kara A, Molina G, et al. Artificial intelligence applications in drug discovery and drug delivery: revolutionizing personalized medicine. *Pharmaceutics*. 2024;16(10):1328. doi: 10.3390/pharmaceutics16101328.

18. Price WN II, Gerke S, Cohen IG. Liability for use of artificial intelligence in medicine. In: Solaiman B, Cohen IG, editors. *Research handbook on health, AI and the law*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing; 2024. p. 150.

19. Chomutare T, Tejedor M, Svenning TO, Marco-Ruiz L, Tayefi M, Lind K, et al. Artificial intelligence implementation in healthcare: a theory-based scoping review of barriers and facilitators. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:16359. doi: 10.3390/ijerph192316359.

20. Menon S, Trudgill N. How commonly is upper gastrointestinal cancer missed at endoscopy? A meta-analysis. *Endosc Int Open*. 2014;2:E46-E50. doi: 10.1055/s-0034-1365524.

21. Wu L, Zhou W, Wan X, Zhang J, Shen L, Hu S, et al. A deep neural network improves endoscopic detection of early gastric cancer without blind spots. *Endoscopy*. 2019;51:522-31. doi: 10.1055/a-0855-3532.

22. Kudo SE, Ichimasa K, Villard B, Mori Y, Misawa M, Saito S, et al. Artificial intelligence system to determine risk of T1 colorectal cancer metastasis to lymph node. *Gastroenterology*. 2021;160:1075-84.e2. doi: 10.1053/j.gastro.2020.09.027.

23. Armando LG, Miglio G, de Cosmo P, Cena C. Clinical decision support systems to improve drug prescription and therapy optimisation in clinical practice: a scoping review. *BMJ Health Care Inform.* 2023;30(1):e100683. doi: 10.1136/bmjhci-2022-100683.
24. Amatriain X, Sankar A, Bing J, Bodigutla PK, Hazen TJ, Kazi M. Transformer models: an introduction and catalog. *arXiv [Preprint]*. 2023. doi: 10.48550/arXiv.2302.07730.
25. Azamfirei R, Kudchadkar SR, Fackler J. Large language models and the perils of their hallucinations. *Crit Care.* 2023;27(1):120. doi: 10.1186/s13054-023-04393-x.
26. Hashimoto DA, Ward TM, Meireles OR. The role of artificial intelligence in surgery. *Adv Surg.* 2020;54:89-101. doi: 10.1016/j.yasu.2020.05.010.
27. Bean MG, Thompson A, Ghadimi K. Perioperative cardiovascular evaluation and management for noncardiac surgery. In: *Essentials of cardiac anesthesia for noncardiac surgery: a companion to Kaplan's cardiac anesthesia*. Amsterdam: Elsevier; 2018. p. 2-15.
28. Bihorac A, Ozrazgat-Baslanti T, Ebadi A, Motaei A, Madkour M, Pardalos PM, et al. MySurgeryRisk: development and validation of a machine-learning risk algorithm for major complications and death after surgery. *Ann Surg.* 2019;269:652-62. doi: 10.1097/SLA.0000000000002706.
29. Xin F, Jiang Y, Yang X, Du M, Li X. Computer vision algorithms and hardware implementations: a survey. *Integration.* 2019;69:309-20. doi: 10.1016/j.vlsi.2019.07.005.
30. Rajalingham R, Piccato A, Jazayeri M. Recurrent neural networks with explicit representation of dynamic latent variables can mimic behavioral patterns in a physical inference task. *Nat Commun.* 2022;13:5865. doi: 10.1038/s41467-022-33581-6.
31. Nag S, Baidya ATK, Mandal A, Mathew AT, Das B, Devi B, et al. Deep learning tools for advancing drug discovery and development. *3 Biotech.* 2022;12:110. doi: 10.1007/s13205-022-03165-8.
32. Liu X, Liu C, Huang R, Zhu H, Liu Q, Mitra S, et al. Long short-term memory recurrent neural network for pharmacokinetic-pharmacodynamic modeling. *Int J Clin Pharmacol Ther.* 2021;59:138-46. doi: 10.5414/CP203800.
33. Turchin A, Masharsky S, Zitnik M. Comparison of BERT implementations for natural language processing of narrative medical documents. *Inform Med Unlocked.* 2023;36:101139.
34. Huo L, Tang Y. Multi-objective deep reinforcement learning for personalized dose optimization based on multi-indicator experience replay. *Appl Sci.* 2022;13:325. doi: 10.3390/app13010325.
35. Olivier A, Shields MD, Graham-Brady L. Bayesian neural networks for uncertainty quantification in data-driven materials modeling. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 2021;386:114079.

36. Magris M, Iosifidis A. Bayesian learning for neural networks: an algorithmic survey. *Artif Intell Rev.* 2023;56:11773-823.
37. Pham TH, Qiu Y, Zeng J, Xie L, Zhang P. A deep learning framework for high-throughput mechanism-driven phenotype compound screening and its application to COVID-19 drug repurposing. *Nat Mach Intell.* 2021;3:247-57. doi: 10.1038/s42256-020-00285-9.
38. Meyers J, Fabian B, Brown N. De novo molecular design and generative models. *Drug Discov Today.* 2021;26:2707-15. doi: 10.1016/j.drudis.2021.05.019.
39. Koutroumpa NM, Papavasileiou KD, Papadiamantis AG, Melagraki G, Afantitis A. A systematic review of deep learning methodologies used in the drug discovery process with emphasis on in vivo validation. *Int J Mol Sci.* 2023;24:6573. doi: 10.3390/ijms24076573.
40. Rang M, Li B, Chen H. Application of message passing neural networks for molecular property prediction. *Curr Opin Struct Biol.* 2023;81:102616. doi: 10.1016/j.sbi.2023.102616.
41. Reiser P, Neubert M, Eberhard A, Torresi L, Zhou C, Shao C, et al. Graph neural networks for materials science and chemistry. *Commun Mater.* 2022;3:93. doi: 10.1038/s43246-022-00315-6.
42. Jenkins JL, Bender A, Davies JW. In silico target fishing: predicting biological targets from chemical structure. *Drug Discov Today Technol.* 2006;3:413-21.
43. Afzal AM, Mussa HY, Turner RE, Bender A, Glen RC. A multi-label approach to target prediction taking ligand promiscuity into account. *J Cheminform.* 2015;7:24. doi: 10.1186/s13321-015-0071-9.
44. Wang L, Xie XQ. Computational target fishing: what should chemogenomics researchers expect for the future of in silico drug design and discovery? *Future Med Chem.* 2014;6:247-49. doi: 10.4155/fmc.14.5.
45. Iorio F, Bosotti R, Scacheri E, Belcastro V, Mithbaekar P, Ferriero R, et al. Discovery of drug mode of action and drug repositioning from transcriptional responses. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010;107:14621-26. doi: 10.1073/pnas.1000138107.
46. Begam BF, Kumar JS. A study on cheminformatics and its applications on modern drug discovery. *Procedia Eng.* 2012;38:1264-75.
47. Pushpakom S, Iorio F, Eyers PA, Escott KJ, Hopper S, Wells A, et al. Drug repurposing: progress, challenges and recommendations. *Nat Rev Drug Discov.* 2019;18:41-58. doi: 10.1038/nrd.2018.168.
48. Nettles JH, Jenkins JL, Bender A, Deng Z, Davies JW, Glick M. Bridging chemical and biological space: "target fishing" using 2D and 3D molecular descriptors. *J Med Chem.* 2006;49:6802-10. doi: 10.1021/jm060902w.
49. Galati S, Di Stefano M, Martinelli E, Poli G, Tuccinardi T. Recent advances

in in silico target fishing. *Molecules*. 2021;26:5124. doi: 10.3390/molecules26175124.

50. Mak KK, Pichika MR. Artificial intelligence in drug development: present status and future prospects. *Drug Discov Today*. 2019;24:773-80. doi: 10.1016/j.drudis.2018.11.014.

51. Zhang X, Wu F, Yang N, Zhan X, Liao J, Mai S, et al. In silico methods for identification of potential therapeutic targets. *Interdiscip Sci Comput Life Sci*. 2022;14:285-310. doi: 10.1007/s12539-021-00491-y.

52. Jiang F, Jiang Y, Zhi H, Dong Y, Li H, Ma S, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke Vasc Neurol*. 2017;2:230-43. doi: 10.1136/svn-2017-000101.

53. Manikiran SS, Prasanthi NL. Artificial intelligence: milestones and role in pharma and healthcare sector. *Pharma Times*. 2019;51:10-11.

REFERENCES

1. Big hopes for big data. *Nat Med*. 2020;26(1):1. doi: 10.1038/s41591-019-0740-8.

2. Rose C, Chen JH. Learning from the EHR to implement AI in healthcare. *NPJ Digit Med*. 2024;7:330. doi: 10.1038/s41746-024-01340-0.

3. Jackson VE, Wu Y, Bonelli R, Owen JP, Scott LW, Farashi S, et al. Multi-omic spatial effects on high-resolution AI-derived retinal thickness. *Nat Commun*. 2025;16:1317. doi: 10.1038/s41467-024-55635-7.

4. Sempionatto JR, Lasalde-Ramírez JA, Mahato K, Wang J, Gao W. Wearable chemical sensors for biomarker discovery in the omics era. *Nat Rev Chem*. 2022;6:899-915. doi: 10.1038/s41570-022-00439-w.

5. Acosta JN, Falcone GJ, Rajpurkar P, Topol EJ. Multimodal biomedical AI. *Nat Med*. 2022;28:1773-84. doi: 10.1038/s41591-022-01981-2.

6. Bhattamisra SK, Banerjee P, Gupta P, Mayuren J, Patra S, Candasamy M. Artificial intelligence in pharmaceutical and healthcare research. *Big Data Cogn Comput*. 2023;7(1):10. doi: 10.3390/bdcc7010010.

7. Mukhamediev RI, Popova Y, Kuchin Y, Zaitseva E, Kalimoldayev A, Symagulov A, et al. Review of artificial intelligence and machine learning technologies: classification, restrictions, opportunities and challenges. *Mathematics*. 2022;10:2552. doi: 10.3390/math10152552.

8. Voshev DV, Shepel RN, Vosheva NA, Drapkina OM. Artificial intelligence in healthcare: historical path, challenges and prospects (1960-2025). *Pervichnaya mediko-sanitarnaya pomoshch*. 2025;2(3):35-47. doi: 10.15829/3034-4123-2025-72. (In Russ.)

9. Kolluri S, Lin J, Liu R, Zhang Y, Zhang W. Machine learning and artificial intelligence in pharmaceutical research and development: a review. *AAPS J*. 2022;24(1):19. doi: 10.1208/s12248-021-00644-3.

10. Culyer AJ, Newhouse JP, editors. Handbook of health economics. Amsterdam: Elsevier; 2000.
11. Ogarok MA. Artificial intelligence in judicial interpretation of law. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya i pravo*. 2025;15(4):88-104. doi: 10.21869/2223-1501-2025-15-4-88-104. (In Russ.)
12. Zaitseva TN, Baraksanova KM. Information security risk analysis in medical rehabilitation centres: problems and prospects. Review. *Vestnik vosstanovitel'noy meditsiny*. 2025;24(1):112-19. doi: 10.38025/2078-1962-2025-24-1-112-19. (In Russ.)
13. Fedotov N. Certain aspects of medical confidentiality protection when using telemedicine technologies in healthcare. *Sravnitel'noe konstitutsionnoe obozrenie*. 2024;33(1):40-59. (In Russ.)
14. Medvedev AI. Legal aspects of artificial intelligence and related technologies. *Zhurnal Suda po intellektualnym pravam*. 2022;(4):48-63. doi: 10.58741/23134852_2022_4_48. (In Russ.)
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. Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations and Directives (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union [Internet]. 2024 [cited 2026 Jul 20]. Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj>.
17. Serrano DR, Luciano FC, Anaya BJ, Ongoren B, Kara A, Molina G, et al. Artificial intelligence applications in drug discovery and drug delivery: revolutionizing personalized medicine. *Pharmaceutics*. 2024;16(10):1328. doi: 10.3390/pharmaceutics16101328.
18. Price WN II, Gerke S, Cohen IG. Liability for use of artificial intelligence in medicine. In: Solaiman B, Cohen IG, editors. *Research handbook on health, AI and the law*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing; 2024. p. 150.
19. Chomutare T, Tejedor M, Svenning TO, Marco-Ruiz L, Tayefi M, Lind K, et al. Artificial intelligence implementation in healthcare: a theory-based scoping review of barriers and facilitators. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:16359. doi: 10.3390/ijerph192316359.
20. Menon S, Trudgill N. How commonly is upper gastrointestinal cancer missed at endoscopy? A meta-analysis. *Endosc Int Open*. 2014;2:E46-E50. doi: 10.1055/s-0034-1365524.
21. Wu L, Zhou W, Wan X, Zhang J, Shen L, Hu S, et al. A deep neural network improves endoscopic detection of early gastric cancer without blind spots. *Endoscopy*. 2019;51:522-31. doi: 10.1055/a-0855-3532.

22. Kudo SE, Ichimasa K, Villard B, Mori Y, Misawa M, Saito S, et al. Artificial intelligence system to determine risk of T1 colorectal cancer metastasis to lymph node. *Gastroenterology*. 2021;160:1075-84.e2. doi: 10.1053/j.gastro.2020.09.027.
23. Armando LG, Miglio G, de Cosmo P, Cena C. Clinical decision support systems to improve drug prescription and therapy optimisation in clinical practice: a scoping review. *BMJ Health Care Inform*. 2023;30(1):e100683. doi: 10.1136/bmjhci-2022-100683.
24. Amatriain X, Sankar A, Bing J, Bodigutla PK, Hazen TJ, Kazi M. Transformer models: an introduction and catalog. *arXiv [Preprint]*. 2023. doi: 10.48550/arXiv.2302.07730.
25. Azamfirei R, Kudchadkar SR, Fackler J. Large language models and the perils of their hallucinations. *Crit Care*. 2023;27(1):120. doi: 10.1186/s13054-023-04393-x.
26. Hashimoto DA, Ward TM, Meireles OR. The role of artificial intelligence in surgery. *Adv Surg*. 2020;54:89-101. doi: 10.1016/j.yasu.2020.05.010.
27. Bean MG, Thompson A, Ghadimi K. Perioperative cardiovascular evaluation and management for noncardiac surgery. In: *Essentials of cardiac anesthesia for noncardiac surgery: a companion to Kaplan's cardiac anesthesia*. Amsterdam: Elsevier; 2018. p. 2-15.
28. Bihorac A, Ozrazgat-Baslanti T, Ebadi A, Motaei A, Madkour M, Pardalos PM, et al. MySurgeryRisk: development and validation of a machine-learning risk algorithm for major complications and death after surgery. *Ann Surg*. 2019;269:652-62. doi: 10.1097/SLA.0000000000002706.
29. Xin F, Jiang Y, Yang X, Du M, Li X. Computer vision algorithms and hardware implementations: a survey. *Integration*. 2019;69:309-20. doi: 10.1016/j.vlsi.2019.07.005.
30. Rajalingham R, Piccato A, Jazayeri M. Recurrent neural networks with explicit representation of dynamic latent variables can mimic behavioral patterns in a physical inference task. *Nat Commun*. 2022;13:5865. doi: 10.1038/s41467-022-33581-6.
31. Nag S, Baidya ATK, Mandal A, Mathew AT, Das B, Devi B, et al. Deep learning tools for advancing drug discovery and development. *3 Biotech*. 2022;12:110. doi: 10.1007/s13205-022-03165-8.
32. Liu X, Liu C, Huang R, Zhu H, Liu Q, Mitra S, et al. Long short-term memory recurrent neural network for pharmacokinetic-pharmacodynamic modeling. *Int J Clin Pharmacol Ther*. 2021;59:138-46. doi: 10.5414/CP203800.
33. Turchin A, Masharsky S, Zitnik M. Comparison of BERT implementations for natural language processing of narrative medical documents. *Inform Med Unlocked*. 2023;36:101139.
34. Huo L, Tang Y. Multi-objective deep reinforcement learning for personalized dose optimization based on multi-indicator experience replay. *Appl Sci*.

- 2022;13:325. doi: 10.3390/app13010325.
35. Olivier A, Shields MD, Graham-Brady L. Bayesian neural networks for uncertainty quantification in data-driven materials modeling. *Comput Methods Appl Mech Eng.* 2021;386:114079.
36. Magris M, Iosifidis A. Bayesian learning for neural networks: an algorithmic survey. *Artif Intell Rev.* 2023;56:11773-823.
37. Pham TH, Qiu Y, Zeng J, Xie L, Zhang P. A deep learning framework for high-throughput mechanism-driven phenotype compound screening and its application to COVID-19 drug repurposing. *Nat Mach Intell.* 2021;3:247-57. doi: 10.1038/s42256-020-00285-9.
38. Meyers J, Fabian B, Brown N. De novo molecular design and generative models. *Drug Discov Today.* 2021;26:2707-15. doi: 10.1016/j.drudis.2021.05.019.
39. Koutroumpa NM, Papavasileiou KD, Papadiamantis AG, Melagraki G, Afantitis A. A systematic review of deep learning methodologies used in the drug discovery process with emphasis on in vivo validation. *Int J Mol Sci.* 2023;24:6573. doi: 10.3390/ijms24076573.
40. Rang M, Li B, Chen H. Application of message passing neural networks for molecular property prediction. *Curr Opin Struct Biol.* 2023;81:102616. doi: 10.1016/j.sbi.2023.102616.
41. Reiser P, Neubert M, Eberhard A, Torresi L, Zhou C, Shao C, et al. Graph neural networks for materials science and chemistry. *Commun Mater.* 2022;3:93. doi: 10.1038/s43246-022-00315-6.
42. Jenkins JL, Bender A, Davies JW. In silico target fishing: predicting biological targets from chemical structure. *Drug Discov Today Technol.* 2006;3:413-21.
43. Afzal AM, Mussa HY, Turner RE, Bender A, Glen RC. A multi-label approach to target prediction taking ligand promiscuity into account. *J Cheminform.* 2015;7:24. doi: 10.1186/s13321-015-0071-9.
44. Wang L, Xie XQ. Computational target fishing: what should chemogenomics researchers expect for the future of in silico drug design and discovery? *Future Med Chem.* 2014;6:247-49. doi: 10.4155/fmc.14.5.
45. Iorio F, Bosotti R, Scacheri E, Belcastro V, Mithbaokar P, Ferriero R, et al. Discovery of drug mode of action and drug repositioning from transcriptional responses. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2010;107:14621-26. doi: 10.1073/pnas.1000138107.
46. Begam BF, Kumar JS. A study on cheminformatics and its applications on modern drug discovery. *Procedia Eng.* 2012;38:1264-75.
47. Pushpakom S, Iorio F, Eyers PA, Escott KJ, Hopper S, Wells A, et al. Drug repurposing: progress, challenges and recommendations. *Nat Rev Drug Discov.* 2019;18:41-58. doi: 10.1038/nrd.2018.168.
48. Nettles JH, Jenkins JL, Bender A, Deng Z, Davies JW, Glick M. Bridging

chemical and biological space: “target fishing” using 2D and 3D molecular descriptors. *J Med Chem.* 2006;49:6802-10. doi: 10.1021/jm060902w.

49. Galati S, Di Stefano M, Martinelli E, Poli G, Tuccinardi T. Recent advances in in silico target fishing. *Molecules.* 2021;26:5124. doi: 10.3390/molecules26175124.

50. Mak KK, Pichika MR. Artificial intelligence in drug development: present status and future prospects. *Drug Discov Today.* 2019;24:773-80. doi: 10.1016/j.drudis.2018.11.014.

51. Zhang X, Wu F, Yang N, Zhan X, Liao J, Mai S, et al. In silico methods for identification of potential therapeutic targets. *Interdiscip Sci Comput Life Sci.* 2022;14:285-310. doi: 10.1007/s12539-021-00491-y.

52. Jiang F, Jiang Y, Zhi H, Dong Y, Li H, Ma S, et al. Artificial intelligence in healthcare: past, present and future. *Stroke Vasc Neurol.* 2017;2:230-43. doi: 10.1136/svn-2017-000101.

53. Manikiran SS, Prasanthi NL. Artificial intelligence: milestones and role in pharma and healthcare sector. *Pharma Times.* 2019;51:10-11.