



Строгая Н.В.¹ ✉, Петрученя А.В.¹, Ревтович М.Ю.¹, Строгий В.В.¹, Батян Г.М.¹,
Соколова М.В.²

¹ Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Беларусь

² Городская детская инфекционная клиническая больница, Минск, Беларусь

Применение технологии искусственного интеллекта в детской кардиоревматологии: перспективы и нерешенные вопросы

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: Строгая Н.В. – разработка концепции и дизайна, обзор литературы, написание текста, оформление статьи; Петрученя А.В. – обзор литературы, написание текста, оформление статьи; Ревтович М.Ю. – разработка концепции, редактирование текста; Строгий В.В. – разработка концепции, редактирование текста; Батян Г.М. – обзор литературы, редактирование текста; Соколова М.В. – редактирование текста. Все авторы ознакомились и утвердили окончательную версию рукописи.

Подана: 24.09.2025

Принята: 05.02.2026

Контакты: nata931994@gmail.com

Резюме

В представленном обзоре рассмотрены современные возможности и перспективы применения искусственного интеллекта (ИИ) в детской кардиологии и ревматологии. Особое внимание уделено использованию ИИ для повышения точности диагностики, прогнозирования рисков и оптимизации лечения у детей с сердечно-сосудистыми и иммуновоспалительными ревматическими заболеваниями. Описаны алгоритмы машинного обучения и нейросетевые технологии, применяемые для анализа медицинских изображений, электрокардиограмм и комплексных клинических данных. Рассмотрены преимущества ИИ, включая персонализированный подход к терапии и непрерывный мониторинг состояния пациентов с помощью носимых устройств. Отмечены также основные вызовы и ограничения внедрения ИИ в клиническую практику, такие как необходимость высокого качества данных, этические аспекты и техническая интеграция. Работа подчеркивает значимость развития и интеграции ИИ-технологий для улучшения диагностики и лечения сложных заболеваний детского возраста, что может существенно повысить эффективность медицинской помощи в кардиологии и ревматологии.

Ключевые слова: детская кардиология, детская ревматология, искусственный интеллект, машинное обучение, нарушения ритма сердца, электрокардиография, эхокардиография

Strogaya N.¹ ✉, Petruchenya A.¹, Reutovich M.¹, Strogiy V.¹, Batyan G.¹, Sokolova M.²

¹ Belarusian State Medical University, Minsk, Belarus

² City Children's Infectious Diseases Clinical Hospital, Minsk, Belarus

Application of Artificial Intelligence Technology in Pediatric Cardiorheumatology: Prospects and Unresolved Issues

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: Strogaya N. – study concept and design, literature review, text writing, study design; Petruchenya A. – literature review, text writing, study design; Reutovich M. – study concept, text editing; Strogiy V. – study concept, text editing; Batyan G. – literature review, text editing; Sokolova M. – text editing. All the authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

Submitted: 24.09.2025

Accepted: 05.02.2026

Contacts: nata931994@gmail.com

Abstract

This review examines the current opportunities and prospects for the use of artificial intelligence (AI) in pediatric cardiology and rheumatology. Special attention is paid to the use of AI to improve the accuracy of diagnosis, predict risks, and optimize treatment in children with cardiovascular and immuno-inflammatory rheumatic diseases. Machine learning algorithms and neural network technologies used to analyze medical images, electrocardiograms, and comprehensive clinical data are described. The advantages of AI are considered, including a personalized approach to therapy and continuous monitoring of patients' condition using wearable devices. The main challenges and limitations of the introduction of AI into clinical practice, such as the need for high-quality data, ethical aspects, and technical integration, are also considered. The work highlights the importance of developing and integrating AI technologies to improve the diagnosis and treatment of complicated childhood diseases, which could significantly enhance the effectiveness of medical care in cardiology and rheumatology.

Keywords: pediatric cardiology, pediatric rheumatology, artificial intelligence, machine learning, cardiac arrhythmias, electrocardiography, echocardiography

■ ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект (ИИ) – это комплекс технологических решений, имитирующий когнитивные функции человека, включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма, позволяющий при выполнении задач достигать результатов, как минимум сопоставимых с результатами интеллектуальной деятельности человека. В более широком понимании ИИ представляет собой область инженерии, ориентированную на создание устройств, способных получать, обрабатывать, обучаться, выполнять задачи в виде обнаружения, восприятия, распознавания, принятия решений, классификации и оценки полученных данных, т. е. выполнять компьютерное имитирование поведения человека [1]. История ИИ берет свое начало в 1943 г. с создания американскими исследователями Warren McCulloch

и Walter Pitts модели для нейронных сетей, основанной на алгоритмах, названных в последующем пороговой логикой. В дальнейшем Frank Rosenblatt (1950–1958 гг.) создал первую в мире модель машинного обучения. Последующее развитие компьютерных технологий способствовало созданию корпорацией IBM суперкомпьютеров Watson с большой скоростью обработки информации. Первая область практического применения технологий ИИ – авиация, в перспективе – создание беспилотных транспортных средств. Концепция ИИ включает в себя машинное обучение, глубокое обучение, и в последнее время некоторые исследователи выделяют и когнитивное вычисление. Машинное обучение представляет собой процесс нахождения закономерностей в базе данных, может проводиться как без участия, так и с участием человека [2]. Глубокое обучение предусматривает уже применение нейронной сети и имитирует работу мозга, например, распознавание изображений, фотографий, речи [3]. Итогом данной технологии является когнитивное вычисление, которое создает автоматизированную компьютерную модель решения определенной проблемы. ИИ является частью современной цифровой трансформации общества, происходящей во всех областях экономики и научных отраслях, включая медицину и систему здравоохранения. Перегруженность врача увеличивающимся объемом информации нередко приводит к затруднению в принятии правильного решения. Применение компьютерных систем, обладающих неограниченными возможностями в хранении большого объема данных и их последующей интеллектуальной обработке, в конечном итоге способствует снижению нагрузки на врача, оказанию точной, быстрой и персонализированной помощи пациенту. Кроме того, применение технологии ИИ способствует улучшению не только лечебно-диагностического процесса, но и позволяет разрабатывать лекарства и прогнозировать различные риски в дальнейшем.

На сегодня в мире основными направлениями применения технологии ИИ в кардиологии являются [4]:

- роботизация кардиохирургических манипуляций;
- совершенствование визуализации;
- длительное мониторирование параметров работы сердечно-сосудистой системы (ССС);
- прогнозирование летального исхода пациента;
- персонализированная медицина;
- персональный помощник врача.

Использование технологии ИИ в здравоохранении может коренным образом изменить отрасль здравоохранения. Всемирная организация здравоохранения утверждает, что ИИ может способствовать улучшению показателей здоровья населения путем повышения точности диагностики и лечения заболеваний и самое главное дополнять знания, навыки медицинских работников [5]. Исходя из возможностей рассматриваемой технологии и применения ее в конкретной медицинской области, целями ее использования выступают [6]:

- улучшение сбора данных (например, повышение точности диагностики);
- выявление заболевания на ранних этапах и улучшение прогнозирования;
- расширение доступа к качественному медицинскому обслуживанию населения;
- улучшение наблюдения за течением заболевания и своевременность проведения вмешательства;

- открытие новых неизвестных зависимостей (связей) между клиническим проявлением заболевания, лабораторными и инструментальными данными;
- сокращение влияния человеческого фактора;
- снижение стоимости медицинского обслуживания;
- расширение возможностей визуализации с применением голографической визуализации, виртуальной, расширенной и смешанной реальности;
- улучшение профессионального обмена данными.

Как показало практическое внедрение технологии ИИ в последнее десятилетие, имеются определенные проблемы, возникающие на различных этапах его применения [7]:

- несовершенство технологии, низкое качество данных, длительность сбора данных;
- необходимость привлечения инвестиций;
- точность прогноза и анализа;
- организационная готовность;
- проблема конфиденциальности;
- отсутствие образования в области ИИ для врачей.

В настоящее время технологии ИИ получают свое распространение в различных отраслях медицины в Республике Беларусь, создавая реальные предпосылки для повышения качества оказания медицинской помощи населению страны. Однако в настоящее время в Республике Беларусь нет отдельного закона об использовании ИИ, регламентирующего его работу, но имеются нормативно-правовые акты, которые затрагивают данную сферу. Среди них модельный закон «О технологиях искусственного интеллекта», одобренный Межпарламентской ассамблеей СНГ и разработанный Объединенным институтом проблем информатики НАН Беларуси, Декрет № 8 «О развитии цифровой экономики» от 21 декабря 2017 г. [8].

Одним из перспективных направлений является внедрение ИИ в детскую кардиоревматологию.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Провести всесторонний обзор, проанализировав существующую научную литературу о взаимосвязи между кардиоревматологией детского возраста и ИИ. В рамках данной цели были рассмотрены оригинальные исследовательские статьи, в которых обсуждалось применение ИИ в детской кардиоревматологии, и обзорные статьи, посвященные взаимосвязи между детской кардиологией и ревматологией и технологией машинного обучения.

■ МЕТОДОЛОГИЯ ОБЗОРА

Нами был проведен анализ научных публикаций в соответствии с рекомендациями Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (см. таблицу) [9]. Поиск литературы проводился в PubMed и Google Scholar на основе следующих поисковых запросов: artificial intelligence, pediatric cardiology, pediatric rheumatology, deep learning. После первого этапа поиска дублирующие исследования были исключены, а в дальнейшем были оценены аннотации работ на соответствие критериям включения и исключения для каждой научной публикации (см. рисунок). В исследование включались публикации на английском языке за период с 2015 г. по май 2025 г.



Дизайн проведенного обзора литературы Review design

Публикации, основанные на использовании технологии ИИ в детской кардиоревматологии Publications based on the use of AI technology in pediatric cardiorheumatology

№	Авторы	Год	Область применения	Применение технологии ИИ
Детская кардиология				
1	Sumeet Gandhi et al.	2018	Эхокардиография	Увеличение точности и эффективности проведения эхокардиографического исследования сердца у детей [10]
2	Rhodri Davies et al.	2020	МРТ-диагностика заболеваний сердца	Анализ сканов МРТ с поддающимся количественной оценке уровнем достоверности результатов измерений фракции выброса [11]
3	Jingjing LV et al.	2021	Пропедевтика	ИИ-платформа аускультации при выявлении патологических сердечных тонов [12]
4	Ulrich Bodenhofer et al.	2021	Прогнозирование рисков послеоперационных осложнений у детей с ВПС	Прогнозирование результатов операций на клапанах сердца [13]
5	Hui Shi et al.	2022	Коррекция белково-энергетической недостаточности у детей с ВПС	Модель машинного обучения для выбора специфической терапии и стратегии последующего наблюдения за питанием, прогнозирования развития белково-энергетического дефицита у детей с скорректированным ВПС через 1 год после операции [14]

Окончание таблицы

6	Sweatt et al.	2019	Легочная артериальная гипертензия (ЛАГ)	Машинное обучение классификации ЛАГ по иммунологическим фенотипам с различными клиническими рисками, содержанием цитокинов, проведением иммунотерапии [15]
7	Anjewierden S., O'Sullivan D.	2023	Электрокардиография	Выявление дисфункции правого и левого желудочков у детей с использованием ЭКГ [16]
8	De Vries I.R.	2023	Пренатальная диагностика ВПС у плода	Использование ИИ для анализа УЗ-изображений с целью пренатального выявления ВПС у плода [17]
9	Mayourian J.	2024	Электрокардиография	Анализ ЭКГ у детей для прогнозирования дисфункции левого желудочка и ремоделирования миокарда [18]
10	Rahman J.	2024	Электрокардиография	Использование ИИ для диагностики брадикардии у новорожденных [19]
11	Mayourian J.	2024	Электрокардиография	Прогнозирование смертности после корригированной тетрады Фалло [20]
12	Chen Chen et al.	2020	Кардиохирургия	Использование визуализирующих методов (КТ, МРТ, Эхо-КГ) и технологии ИИ для моделирования различных особенностей сердца и сосудов [21]
13	Zhang et al.	2021	Кардиохирургия (тетрада Фалло)	Метод оптимизации размера, формы и положения заплаты при хирургическом лечении врожденной патологии легочной артерии [22]
14	Simona Aufero et al.	2022	Синдром удлиненного QT	Диагностика синдрома удлиненного интервала QT [23]
15	Siontis et al.	2021	Гипертрофическая кардиомиопатия	Модель глубокого обучения ИИ для идентификации гипертрофической кардиомиопатии [24]
Детская ревматология				
16	Van Nieuwenhove et al.	2019	Ювенильный идиопатический артрит (ЮИА)	Выявление иммунологических маркеров ЮИА и определение подтипов заболевания [25]
17	Eng et al.	2019	ЮИА	Прогноз течения ЮИА [26]
18	Ghosh P. et al.	2022	Болезнь Кавасаки и мультисистемный воспалительный синдром (MIS-C)	Определение клинических и лабораторных показателей, помогающих контролировать тяжесть течения заболевания [27]
19	Mo et al.	2019	ЮИА	Прогнозирование эффективности лечения метотрексатом при ЮИА [28]
20	Xue et al.	2022	Ювенильный дерматомиозит (ЮДМ)	Прогностическая модель для скрининга белка, ассоциированного с дифференцировкой меланомы (anti-MDA5) при ЮДМ [29]
21	Hu et al.	2023	ЮДМ	Модель прогнозирования развития интерстициальной болезни легких, ассоциированной с ЮДМ, путем анализа неинвазивных клинических характеристик [30]
22	Gomez Hernandez et al.	2021	Синдром Шегрена	Оценка наличия хемокинов, цитокинов и биомаркеров воспаления в слюне у детей с синдромом Шегрена [31]
23	Poppenberg et al.	2019	ЮИА	Технология ИИ, используемая с целью прогнозирования стадии активности заболевания при ЮИА [32]
24	Van Leeuwen et al.	2024	ANCA-васкулиты	Диагностика пациентов с ANCA-васкулитом [33]
25	Goossens et al.	2023	ЮИА	Оценка использования акустической эмиссии в качестве биомаркера для выявления поражения колена при ЮИА с помощью ИИ [34]

Критериями включения были: исследования «случай – контроль», серии случаев и перекрестные исследования, обзоры и мнения экспертов об использовании ИИ в детской кардиологии и ревматологии. Исключались работы, если они не имели прямого отношения к ИИ или были ориентированы на иную специализацию, а также статьи, в которых отсутствовал полный текст, тезисы конференций, статьи и главы из книг; дублирующиеся исследования были исключены. Исследования основных направлений, которые описывают роль ИИ в детской кардиоревматологии, представлены в таблице.

■ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДЕТСКОЙ КАРДИОЛОГИИ

Детская кардиология как дисциплина развивалась как специальность в течение последних 60 лет, начинаясь с попыток лечения врожденных пороков сердца (ВПС) [35]. Сегодня доказана эффективность алгоритмов машинного обучения в интерпретации сердечных шумов при ВПС, в их дифференцировке от физиологических шумов с периода новорожденности [12]. Недавнее использование компьютерных сетей глубокого обучения продемонстрировало возможность посредством магнитно-резонансной томографии (МРТ) обнаруживать клапанные дефекты одновременно во всех четырех камерах сердца [21]. К сожалению, пока существует только один систематический анализ коррекции дефекта межпредсердной перегородки с использованием роботизированной ассистенции, но вопрос применения ИИ на всех этапах лечения пациентов с ВПС пока не обсуждался. Большое внимание уделяется применению ИИ в области пренатального скрининга ВПС. С этой целью проводится автоматизированная сегментация, статистическое моделирование формы и неконтролируемая иерархическая кластеризация для соответствующей группировки пациентов и выявления новых подгрупп плодов с возможными ВПС [17]. После рождения младенцев авторы проводили первичный скрининг их на ВПС, который состоял из комбинации различных исследований: аускультации сердца, пульсовой оксиметрии, рентгенографии грудной клетки и электрокардиографии (ЭКГ). Программа компьютерной аускультации позволила пользователю сохранять и передавать звуки сердца на специальные платформы для анализа шумов с помощью ИИ. Метод интеллектуальной диагностики шумов ВПС у детей с использованием электронного стетоскопа успешно разработан и описан в данной статье и может быть использован для онлайн-скрининга ВПС у детей. После сегментации 1-го и 2-го тона сердца в качестве входных данных классификатора были извлечены десять признаков, специфичных для шумов ВПС. Восемьдесят шесть классификаторов искусственной нейронной сети были объединены в систему классификации для выявления шумов ВПС. Однако это программное обеспечение не было принято для клинического использования из-за его ограничений в виде небольшого количества и отсутствия широкого клинического внедрения.

Большое внимание уделяется применению ИИ в вопросах обработки и интерпретации сердечно-сосудистых изображений, предоперационному и операционному ведению пациента, а также прогнозу и стратификации рисков результатов оперативного лечения [13, 14].

Исследования ИИ на основе звуков сердца все еще находятся на предварительной стадии, хотя уже достигнут большой прогресс в выявлении клапанных

заболеваний и ВПС, однако все они находятся на стадии исследования алгоритмов диагностики заболеваний, и мало исследований по тяжести заболеваний, удаленному мониторингу, прогнозированию [12]. В перспективе для будущих исследований ведется создание большой стандартизированной базы звуков сердца и унификация этих алгоритмов. Таким образом, точка приложения ИИ в решении проблемы ВПС у детей представляет собой сбор множества данных у пациентов для постановки более точного диагноза и определения конкретных фенотипов ВПС для последующей разработки индивидуализированного лечения. Это включает в себя сбор не только клинической информации, но и факторов окружающей среды, данных различных методов визуализации, социальных детерминант, генетических данных.

За последние 10 лет было изучено и опубликовано множество приложений на базе глубокого мышления для диагностики и прогнозирования течения ВПС [13]. В современных условиях основными направлениями применения ИИ при исследовании ВПС у детей являются:

- пренатальная диагностика и стратификация риска (проведение генетического тестирования и расширенной эхокардиографии (Эхо-КГ) плода с использованием ИИ);
- постнатальная диагностика и наблюдение (более быстрая и точная идентификация подтипов и тяжести ВПС, более точная оценка параметров гемодинамики, персонализированные стратегии лечения на основе индивидуальных данных пациента);
- долгосрочный и дистанционный мониторинг физиологических параметров у детей с ВПС.

ЭКГ можно использовать для диагностики большого спектра заболеваний ССС, включая и ВПС. Согласно Awpi Y. Hannun et al. (2019), ежегодно во всем мире регистрируется более 300 миллионов ЭКГ, что является огромным объемом данных для врачей [36]. Это и внесло вклад в развитие обучения машинного интеллекта анализу изменений на ЭКГ. За последние 50 лет было предложено множество вариантов изучения изменений на ЭКГ, основанных на машинном обучении, или расчетных параметров. Следует отметить и тот факт, что большинство моделей изучения изменений на ЭКГ разрабатывались только на данных, полученных с 1 отведения, что недостаточно для полноценной оценки деятельности проводящей системы сердца.

Основными направлениями применения ИИ при анализе ЭКГ на сегодня является диагностика ВПС по данным ЭКГ, диагностика и классификация нарушений ритма сердца у детей, диагностика вентрикулярной дисфункции, стратификация риска неблагоприятных сердечно-сосудистых событий [37]. При этом используются различные методы ИИ, преимущественно модели глубокого обучения, такие как CNN (ConvNet, сверточная нейронная сеть). Этапы предварительной обработки данных включают фильтрацию, нормализацию и сегментацию сигналов ЭКГ. Авторы указывают на серьезные проблемы интерпретации детской ЭКГ, связанные с необходимостью учета возрастных физиологических изменений. Необходимы возрастные референтные значения, поскольку нормальные пределы для младенцев заметно отличаются от нормальных значений для подростков. Модели ИИ должны быть обучены на возрастных данных и включать в себя механизмы учета изменений в развитии, чтобы избежать неправильной классификации и ошибочных диагнозов.



Гетерогенность ВПС диктует необходимость того, чтобы алгоритмы искусственного интеллекта выявляли разнообразные закономерности и различали условия с перекрывающимися характеристиками. Такие показатели, как чувствительность и специфичность, которые часто используются для оценки эффективности модели, могут переоценивать реальную полезность, когда прогнозируемое состояние встречается в популяции нечасто. Более того, полученное одинаковое значение чувствительности и специфичности может не соответствовать различным приоритетам медицинских тестов: скрининговые тесты отдают приоритет чувствительности, тогда как подтверждающие тесты могут больше фокусироваться на их специфичности. Следующая проблема связана с ограниченной доступностью данных и проблемой конфиденциальности. По сравнению со взрослым населением, наборы данных педиатрической ЭКГ немногочисленны из-за этических соображений при получении согласия и обеспечении конфиденциальности данных для несовершеннолетних. Редкость определенных состояний и вариабельность регистрации ЭКГ в разных учреждениях способствуют неоднородности данных. Небольшие размеры выборки могут привести к переобучению, когда модели хорошо работают на обучающих данных, но плохо на невидимых данных. Стратегии преодоления ограничений данных включают увеличение количества данных, трансферное обучение и совместный обмен данными между несколькими учреждениями [38]. Использование ИИ в педиатрии поднимает важные этические вопросы. Защита конфиденциальности пациентов и получение соответствующего согласия имеют решающее значение, особенно при работе с несовершеннолетними. Нерепрезентативные наборы данных могут привести к алгоритмическим ошибкам, влияющим на диагностическую справедливость [39]. Внедрение инструментов искусственного интеллекта в клиническую практику требует тщательного планирования и реализации. Чрезвычайно важны удобные для пользователя интерфейсы, которые четко представляют информацию и соответствуют существующим электронным медицинским картам и диагностическим системам. Необходимы эффективные программы для обучения врачей возможностям и ограничениям ИИ, повышения уверенности и правильного использования. Важно отметить, что ИИ должен служить вспомогательным инструментом для улучшения, а не замены клинических суждений, предлагая поддержку принятия решений, не диктуя осторожность [40].

В работе, посвященной использованию ИИ для пренатальной диагностики ВПС, описывается метод, сочетающий в себе последние достижения в области неинвазивной ЭКГ плода и ИИ для автоматического выявления ВПС. Данный метод достиг уровня выявления 63% всех ВПС и 75% критических ВПС [10, 17]. Данное исследование показывает, что уровень выявления ВПС может быть повышен за счет использования скрининга на основе ЭКГ в дополнение к стандартному ультразвуковому исследованию. Для повышения эффективности и определения преимуществ для клинической практики необходимы дополнительные исследования. Анализ ЭКГ с использованием ИИ обещает быть эффективным средством выявления дисфункции и ремоделирования желудочков у взрослых. Однако его применение в педиатрии остается недостаточно изученным. Глубокое обучение на основе ЭКГ у детей применяется для прогнозирования дисфункции и ремоделирования левого желудочка [17]. Картирование значимости выявило компоненты ЭКГ, влияющие на прогнозы модели (комплексы QRS, зубцы Т при дисфункции ЛЖ). К признакам ЭКГ высокого риска относятся

отрицательная инверсия зубца Т (дисфункция ЛЖ), глубокие зубцы S в отведениях V1 и V2 и высокие зубцы R в отведениях V6 (гипертрофия ЛЖ), а также высокие зубцы R в отведениях V4–V6 (дилатация ЛЖ).

Диагностика предсердных и желудочковых аритмий по данным ЭКГ и начало соответствующего лечения часто выходят за рамки подготовки большинства врачей-педиатров и обычно требуют консультации детского кардиолога или врача функциональной диагностики. Модель ИИ, обученная работе с тысячами диагностированных и отмеченных ЭКГ, может быстро и правильно диагностировать аритмию и предложить пациенту правильные и оптимальные антиаритмические препараты. Примером является стартап Tricot Health, основанный в 2014 г. в Индии, который разработал устройство instaECG™, позволяющее проводить ЭКГ в удаленных местах и загружающее их в облако, где с помощью алгоритмов ИИ производится предварительная интерпретация, а затем врачи-кардиологи проверяют их и составляют план лечения. Hannun et al. использовалась нейронная сеть для классификации ряда аритмий по данным ЭКГ в одном отведении с высокой диагностической эффективностью, аналогичной клинической с точки зрения чувствительности и положительной прогностической ценности [36].

Предложена модель машинного обучения с коррекцией выходных данных: на пути к надежному выявлению брадикардии у новорожденных [23]. Метод глубокого обучения выявляет новые особенности ЭКГ при врожденном синдроме удлинённого интервала QT. В этом исследовании представлены модели одномерной сверточной нейронной сети, обученные для выявления генотип-положительных пациентов с синдромом удлинённого интервала QT по ЭКГ в качестве входных данных. Данное исследование предполагает, что модели глубокого обучения потенциально могут помочь кардиологам в диагностике синдрома удлинённого интервала QT. Более того, объяснимые модели могут быть использованы для выявления новых признаков данного синдрома на ЭКГ, тем самым расширяя его понимание. Глубокий нейронный анализ электрокардиограммы в 12 отведениях позволяет отличить пациентов с врожденным синдромом удлинённого интервала QT от пациентов с приобретенным удлинением интервала QT.

Возможность улучшить обнаружение и/или прогнозирование заболеваний в больших масштабах может открыть новые возможности для скрининга заболеваний, позволяя проводить раннее вмешательство у пациентов, не имеющих клинически выраженных симптомов. Например, конвейеры на базе ИИ могут точно выявлять кардиомиопатии и ВПС по одной записи ЭКГ или Эхо-КГ [11, 17]. Выявление этих заболеваний традиционными методами обычно требует сложных диагностических дорогостоящих тестов. Поэтому гиподиагностика представляет собой серьезную проблему. Использование моделей ИИ для скрининга этих заболеваний позволит сократить число пропущенных случаев. Применение моделей ИИ в медицине не ограничивается разработкой клинически значимых моделей. Недавние исследования продемонстрировали перспективность моделей ИИ в изучении механизмов развития заболеваний благодаря их сочетанию с генетическим и структурным анализом [15].

Детская кардиология охватывает большую и разнородную группу заболеваний ССС, что представляет собой сложную задачу по созданию достаточных наборов клинических данных для обучения и валидации моделей ИИ. Из опубликованных исследований по ИИ в детской кардиологии лишь некоторые были



внедрены в клиническую практику. Одним из таких примеров применения ИИ в реальной клинической практике является использование сверточных нейронных сетей и обучение с помощью бинарных переменных результатов с целью нахождения ассоциации между изменениями на ЭКГ и развитием дисфункции левого желудочка. Если ИИ-алгоритм обнаружит какие-либо изменения на ЭКГ, то в таком случае пациент проходит дополнительное обследование с Эхо-КГ и консультацией врача-кардиолога. Данная практика уже используется в клинике Mount Sinai (США), также недавно было опубликовано исследование, проведенное в Boston Children's Hospital (США), где нейронная сеть была обучена на паре «ЭКГ – Эхо-КГ» пациентов в возрасте до 18 лет без серьезных заболеваний ССС для выявления выраженной дисфункции, гипертрофии или дилатации левого желудочка [18].

Использование ИИ в детской кардиологии может включать в себя не только анализ ЭКГ с целью распознавания нарушений ритма сердца (НРС), но и анализ данных Эхо-КГ, что позволяет дополнительно обратить внимание врача и своевременно выявить изменения [35]. Тем самым возможно использование ИИ для выявления скрытой патологии, которая у детей в силу возрастных особенностей может проявляться неспецифически. Любой перспективный алгоритм ИИ должен быть разработан с использованием большого количества необработанных данных и клинического контроля, чтобы помочь модели научиться интерпретировать полученные данные правильно. Далее модель должна пройти внешнюю валидацию (быть проверенной на большом количестве детальных данных), чтобы обеспечить корректный анализ и результаты.

На современном этапе использование ИИ позволяет проводить мониторинг состояния ССС путем использования умных часов с технологией отслеживания частоты сердечных сокращений (ЧСС), данных насыщения кислородом крови (сатурации), контроля АД с выявлением отклонений в режиме реального времени [41]. Перспективным представляется использование ИИ в телемедицинском консультировании, что позволяет анализировать на платформе ИИ данные пациента на расстоянии.

Об использовании ИИ для прогнозирования послеоперационных результатов при операциях на ВПС сообщают Mohammadi I. et al. (2024) [42]. Полученные результаты превосходят традиционные инструменты прогнозирования риска не только по показателям ближайших послеоперационных рисков, но и по таким долгосрочным показателям, как годовая выживаемость и недостаточность питания в детском возрасте. Авторы указывают, что для оценки практической применимости этих моделей в клинических условиях необходимы дальнейшие исследования с надежной внешней валидацией.

Сегодня глубокое обучение применяется для сегментации изображений основных анатомических структур (желудочки, предсердия и сосуды) посредством использования различных диагностических методов визуализации: МРТ, компьютерную томографию (КТ) и ультразвуковое исследование [20, 21].

Определению прогностических факторов детского миокардита с использованием алгоритма случайных связей и использования машинного обучения для прогнозирования смертности при миокардите посвящена работа Chou F.S. et al. (2020, 2021) [43, 44]. Неревматический миокардит в детском возрасте представляет серьезную проблему как для диагностики, так и для лечения, что обусловлено высоким риском смертности, особенно у новорожденных и в раннем возрасте. О его прогностических

факторах известно мало. При этом некоторые сопутствующие заболевания могут повышать риск неблагоприятных исходов.

Исследованию наличия воспалительного компонента у детей с легочной артериальной гипертензией, генетической составляющей и прогноза данной патологии посвящен ряд работ. Накапливающиеся данные указывают на наличие воспаления при легочной артериальной гипертензии, и в настоящее время изучаются методы лечения, направленные на коррекцию выявленных иммунных нарушений, хотя остается неизвестным, существуют ли отдельные иммунные фенотипы. Проведению скрининга панели генов, связанных с иммунитетом, и разработке новых подходов к диагностике легочной артериальной гипертензии с использованием биоинформатики и машинного обучения посвящена работа Sweatt A.J. et al. (2019) [15]. Авторы идентифицировали панели генов, связанных с иммунитетом, для диагностики легочной гипертензии с использованием биоинформатики и машинного обучения.

Гипертрофическая кардиомиопатия (ГКМП) представляет собой сложную диагностическую и прогностическую задачу ввиду гетерогенности фенотипа и клинического течения. Методы ИИ и машинного обучения открывают перспективы для трансформации роли ЭКГ в диагностике, прогнозировании и лечении ГКМП [24]. При диагностике ГКМП модели машинного обучения продемонстрировали высокую точность дифференциации ГКМП от других сердечных заболеваний, даже в случаях с нормальными показателями ЭКГ. Кроме того, модели ИИ улучшили оценку риска, предсказывая аритмические события, приводящие к внезапной сердечной смерти, и выявляя пациентов с риском фибрилляции предсердий и сердечной недостаточности. Эти модели включают клинические и визуализирующие данные, обеспечивая комплексную оценку профилей риска для пациентов. Остаются нерешенные проблемы, включая потребность в более обширных и разнообразных наборах данных для улучшения обобщаемости моделей и устранения дисбалансов, присущих прогнозированию редких событий. Тем не менее подходы на основе ИИ могут кардинально изменить тактику лечения ГКМП, обеспечивая своевременную и точную диагностику, прогнозирование и персонализированные стратегии лечения, основанные на индивидуальных профилях риска пациента [45].

В заключение отметим, что ИИ в детской кардиологии сегодня все еще находится на начальных стадиях его применения. Однако эти исследования являются многообещающими, и есть четкие доказательства того, что ИИ может улучшить результаты в практической медицине. Возможно, в следующем десятилетии специалисты получат реальную пользу от формального обучения ИИ, разработке и внедрению моделей ИИ в основную педиатрическую кардиологическую помощь.

■ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ДЕТСКОЙ РЕВМАТОЛОГИИ

В динамично развивающейся области детской ревматологии с помощью ИИ наблюдаются успехи в понимании и стратификации заболеваний, разработке биомаркеров, совершенствовании технологий визуализации и разработке персонализированных подходов к лечению. Однако, как и во многих других областях, эти достижения еще не получили клинического применения и подтверждения, а этические вопросы остаются нерешенными. Более того, освоение различных и новых терминов представляет собой сложную задачу для врачей. Следует отметить присутствие

алгоритмов машинного обучения и глубокого обучения в ограниченном наборе исследований, касающихся диагностических подходов и прогнозирования течения иммуновоспалительных ревматических заболеваний. Энтузиазм, связанный с использованием ИИ в ревматологии, обусловлен возможностью анализировать сложные и обширные объемы полученных данных. Это дает возможность создавать модели прогнозирования, адаптированные для повышения персонализированного подхода, а в последующем точности и общей эффективности диагностики, прогнозов и мониторинга течения заболевания, проведения лечения и в конечном счете улучшения показателей качества жизни [27, 46].

Наиболее часто технология ИИ применяется в области диагностики, лечения пациентов с ювенильным идиопатическим артритом (ЮИА). В работе Van Nieuwenhove et al. (2019) показано, как машинное обучение выявляет иммунологический паттерн, связанный с несколькими клиническими вариантами ЮИА. Несмотря на значительное совпадение иммунологического спектра у здоровых детей и пациентов с ЮИА, машинный анализ набора данных показал свою способность отличать пациентов с ЮИА от здоровых лиц контрольной группы с точностью около 90%. С использованием машинного обучения выявлены паттерны поражения суставов, основанные на данных, которые позволяют прогнозировать клинический фенотип и динамику заболевания [25, 26, 32]. Примененный иерархический неконтролируемый подход выявил новый клинический признак – степень локализации воспалительного процесса, который предсказывал исходы в обеих когортах.

Ревматологические заболевания в детской практике представляют собой серьезную проблему глобального здравоохранения, характеризующуюся растущей распространенностью. Эти крайне гетерогенные заболевания включают сложные патофизиологические механизмы, что приводит к разной эффективности лечения у разных людей. Данная вариабельность подчеркивает необходимость персонализированных и точных стратегий лечения. В исследованиях рассматривается возможность использования искусственного интеллекта для прогнозирования эффективности лечения аутоиммунных ревматических заболеваний [28].

Поиску ранних биомаркеров развития ювенильного дерматомиозита (ЮДМ) посвящена работа Y. Xue et al. (2023) [29]. Антитела к MDA5 (антитела к гену 5, ассоциированному с дифференцировкой меланомы) часто ассоциируются с неблагоприятным прогнозом у пациентов с ЮДМ. Во многих развивающихся странах доступ к миозит-специфическим антителам ограничен из-за финансовых и технологических проблем, особенно в отдаленных регионах. Данное исследование было проведено с целью разработки и демонстрации эффективности прогностической модели для скрининга антител к MDA5 у пациентов с ЮДМ на основе общедоступных клинических данных [29, 30].

Синдром Шегрена – аутоиммунное заболевание, чаще всего диагностируемое у взрослых, но может встречаться и у детей. Целью исследования Hernandez Gomez M.P. et al. (2021) было оценить наличие хемокинов, цитокинов и биомаркеров в слюне этих детей, связанных с функциями лимфоцитов и мононуклеарных клеток [31].

Акустическая эмиссия коленных суставов была оценена как удобный неинвазивный цифровой биомаркер воспалительного поражения коленных суставов у небольшой группы детей с ЮИА [34]. Авторы делают вывод о том, что акустическая эмиссия суставов может служить недорогим и простым в использовании цифровым

биомаркером для дифференциации пациентов с ЮИА от здоровых лиц. Использование серийных записей акустической эмиссии суставов может потенциально помочь в мониторинге активности заболевания в суставах, пораженных ЮИА, для своевременного внесения изменений в терапию.

Рассмотрена возможность разработки биомаркеров на основе данных РНК-секвенирования мононуклеарных клеток периферической крови у детей с ювенильным идиопатическим артритом с использованием методов машинного обучения [32]. Данное исследование демонстрирует возможность использования машинного обучения в сочетании с РНК-секвенированием мононуклеарных клеток периферической крови для прогнозирования стадии ЮИА. Таким образом, разработка объективных биомаркеров на основе легкодоступных клинических образцов остается достижимой целью.

Васкулиты – редкие воспалительные заболевания, диагностика которых порой бывает затруднена из-за их многообразия. В обзоре Van Leeuwen et al. (2024) рассматривается использование ИИ для улучшения диагностики и прогнозирования исходов васкулита. Алгоритм ИИ поможет улучшить диагностику и прогнозирование васкулита. Модели глубокого и машинного обучения демонстрируют многообещающие результаты при болезни Кавасаки [33]. Однако для расширения их клинической применимости при различных типах васкулита необходимы более широкие наборы данных, более тщательная внешняя валидация и интеграция новых моделей, таких как большие языковые модели. Поскольку васкулит, ассоциированный с антинейтрофильными цитоплазматическими антителами (АНЦА-васкулит), является редким, опасным для жизни аутоиммунным заболеванием, проведение исследований является сложной, но необходимой задачей. Исследование выявляет преимущества внедрения ИИ, в частности обработки естественного языка (NLP, natural language processing), для точной идентификации редких пациентов с АНЦА-васкулитом в крупных системах электронных медицинских карт и демонстрирует их применимость и мобильность.

Благодаря использованию технологии ИИ раскрыт общий иммунный ответ хозяина при мультисистемном воспалительном синдроме (MIS-C) и болезни Кавасаки [27]. Результаты показывают, что болезнь Кавасаки и MIS-C находятся в том же континууме иммунного ответа хозяина, что и COVID-19. Оба детских синдрома сходятся на цитокиновом шторме, ориентированном на IL15/IL15RA, что указывает на общие проксимальные пути иммунопатогенеза; однако они расходятся по другим лабораторным параметрам и сердечным фенотипам.

ИИ-платформа может помочь врачу при индивидуальном подборе терапии ревматических заболеваний, прогнозируя ответы на иммуносупрессивные препараты (метотрексат, азатиоприн), на биотехнологические лекарственные средства (например, моноклональные антитела к ИЛ-6, ФНО- α), путем расчета дозы препарата с учетом веса, возраста, активности заболевания, наличия сопутствующей патологии, снижая риск побочного действия препаратов. Примером разработанной модели прогнозирования эффективности лечения пациентов с ЮИА является работа, посвященная прогнозированию ответа на метотрексат у пациентов с ЮИА до его введения. Однако простой и надежной модели прогнозирования не было выявлено. Ранее прогнозирование клинического ответа на лечение этанерцептом при ЮИА с использованием машинного обучения обсуждается в исследовании Mo X. et al. (2020) [47].

С использованием передовых алгоритмов машинного обучения была разработана модель предварительного введения препарата с высокой эффективностью прогнозирования ответа на этанерцепт при ЮИА. Врачи и фармацевты могут использовать эту простую и точную модель для раннего прогнозирования ответа на этанерцепт при ЮИА и предотвращения неэффективности лечения или побочных эффектов.

Перспективным является использование технологии машинного обучения при междисциплинарном взаимодействии, например, использование ИИ и данных исследования генома пациентов с ревматическими заболеваниями, что позволит определять риск их развития, утяжеление течения заболевания. Также большую роль играет использование ИИ при обучении врачей – детских кардиоревматологов путем создания виртуальных моделей пациента для определения тактики лечения либо разработка ИИ-ассистентов, позволяющих определить тактику лечения данной патологии.

■ ВОПРОСЫ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ПЕРСОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПАЦИЕНТА ПРИ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

При разработке системы ИИ для использования в сфере здравоохранения важно учитывать применимые правила защиты персональных данных и, что важно, конфиденциальности данных пациента. На фоне возрастающей роли ИИ целесообразным является вопрос рассмотрения безопасности персональных данных пациента, что заключается в предотвращении несанкционированного доступа, утечки, проведения кибератак. Также важным является право пациента или законного представителя пациента давать информированное согласие на обработку и передачу данных ИИ-платформе, контролировать свои данные, знать, для чего и как они будут использоваться в дальнейшем, при этом и пациент, и медицинские работники должны быть осведомлены о возможностях и ограничениях в использовании ИИ. Таким образом, интерфейс ИИ-системы и ее использование должны быть понятными и прозрачными для врачей и пациентов, что увеличивает доверие к используемой ИИ-платформе.

Не менее важным является вопрос об этическом аспекте работы с ИИ: исключение предвзятости в алгоритмах ИИ, уважение автономии и конфиденциальности пациентов либо их законных представителей. Использование ИИ не должно лишать пациента и врача права принимать самостоятельные решения.

Таким образом, использование ИИ требует комплексного подхода, который бы включал в себя технические меры безопасности, прозрачность структуры ИИ-алгоритма, учитывал этические особенности при работе в сфере здравоохранения. Эти важные аспекты могут быть основополагающими в разработке этического кодекса работы с ИИ, который бы регулировал весь цикл ИИ – от разработки до проведения клинических испытаний.

■ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Нельзя отрицать и медицинский эффект от внедрения ИИ в отдаленные регионы страны, что повышает доступность оказания медицинской помощи детскому населению, тем самым улучшая качество жизни подрастающего поколения.

Следующим проблемным вопросом разработанных ИИ-платформ является валидация алгоритмов на взрослой выборке, без включения в обучение системы данных несовершеннолетних пациентов, что снижает специфичность и чувствительность для использования в педиатрии. Также важным аспектом работы с ИИ является интерпретация полученных данных от машинного мышления, чтобы результаты были понятны медицинскому работнику.

Внедрение нового метода или новой технологии в системе здравоохранения от стадии доклинического исследования к использованию в клинической практике сопряжено с определенными трудностями. До того, как новая технология может быть применена в клинической медицине, необходимо решить проблемы, связанные с безопасностью, конфиденциальностью и сохранностью данных пациентов, а также с соблюдением этических норм и медицинского законодательства страны. Поскольку для моделей ИИ необходима загрузка данных пациентов в облачное хранилище для анализа, это требует обеспечения защиты от кибератак. Для технологии ИИ необходимы огромные вычислительные мощности, дорогостоящая инфраструктура и обучение персонала, что является проблемой для развивающихся стран и государств с низким и средним уровнем дохода, где, возможно, экономически выгоднее обучать кардиологов, чем инвестировать в инфраструктуру ИИ.

■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение в практическую деятельность технологий машинного обучения позволит трансформировать и оптимизировать педиатрическую службу, но, что самое важное, требует междисциплинарного взаимодействия между практическим звеном, инженерами и комитетом по биоэтике, чтобы обеспечить безопасное и эффективное внедрение.

Нельзя отрицать, что внедрение ИИ в сферу здравоохранения несет затраты и риск, на которые может оказывать влияние обучение медицинского персонала, обновление оборудования. Большую роль также играют юридические и биоэтические составляющие: ответственность при ошибочном заключении, необходимость регулирования ИИ в здравоохранении, страхование при использовании ИИ в страховой или частной медицинской практике. И конечно, наличие времени для разработки, валидации обученного алгоритма, последующей его интеграции в практическую деятельность. В случае грамотной реализации социальный возврат инвестиций демонстрирует положительный рост за счет прибыли и эффективного использования вложенных средств, а также позволит оценить пользу для общества, что было описано выше.

Экономическая эффективность при внедрении ИИ в здравоохранение и в детскую кардиоревматологию выражается в оптимизации ресурсов, снижении ошибок, вызванных человеческим фактором, улучшении качества жизни детского населения. Вопреки первоначальным затратам на разработку и обучение ИИ технология окупается за счет повышения доступности и качества оказания медицинской помощи, что является перспективным направлением не только для совместной научной и практической деятельности, но и для инвестиций в здравоохранение.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Krajcer Z. Artificial Intelligence in Cardiovascular Medicine: Historical Overview, Current Status, and Future Directions. *Tex Heart Inst J.* 2022;49(2):e207527. doi: 10.14503/THIJ-20-7527
2. Vijayakrishnan R, Steinhubl S.R, Ng K, et al. Prevalence of heart failure signs and symptoms in a large primary care population identified through the use of text and data mining of the electronic health record. *J Card Fail.* 2014;20(7):459–464. doi: 10.1016/j.cardfail.2014.03.008
3. Xu B, Kocyigit D, Grimm R, et al. Applications of artificial intelligence in multimodality cardiovascular imaging: A state-of-the-art review. *Prog Cardiovasc Dis.* 2020;63(3):367–376. doi: 10.1016/j.pcad.2020.03.003
4. Kilić A. Artificial Intelligence and Machine Learning in Cardiovascular Health Care. *Ann Thorac Surg.* 2020;109(5):1323–1329. doi: 10.1016/j.athoracsur.2019.09.042
5. Frolov A. Role of Artificial Intelligence in Modern Cardiology. *Cardiology in Belarus.* 2025;17(4):589–603. doi: 10.34883/PI.2025.17.4.009
6. Leopold J.A., Maron B.A., Loscalzo J. The application of big data to cardiovascular disease: paths to precision medicine. *J Clin Invest.* 2020;130(1):29–38. doi: 10.1172/JCI129203
7. Shaikh M.F.W., Mama M.S., Proddaturi S.H., et al. The Role of Artificial Intelligence in the Prediction, Diagnosis, and Management of Cardiovascular Diseases: A Narrative Review. *Cureus.* 2025;17(3):e81332. doi: 10.7759/cureus.81332
8. Ablomeyko S.V., Ablomeiko M.S., Belotserkovsky A.M., et al. *The main provisions of the model law "On artificial intelligence"*. In: *BIG DATA and Advanced Analytics: collection of scientific articles of the X International Scientific and Practical Conference*. Edt.: Bogush V.A. et al. Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Minsk; 2024: 21–31 (in Russian).
9. Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:m71. doi: 10.1136/bmj.m71
10. Gandhi S., Mosleh W., Shen J., et al. Automation, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Echocardiography: A Brave New World. *Echocardiography* 2018;35(9):1402–1418. doi: 10.1111/echo.14086
11. Davies R., Babu-Narayan S.V. Deep learning in congenital heart disease imaging: hope but not haste. *Heart.* 2020;106(13):960–961. doi: 10.1136/heartjnl-2019-316496
12. Lv J., Dong B., Lei H., et al. Artificial Intelligence-Assisted Auscultation in Detecting Congenital Heart Disease. *Eur. Heart J. Digit. Health* 2021;2(1):119–124. doi: 10.1093/ehjdh/ztaa017
13. Bodenhofer U., Haslinger-Eisterer B., Minichmayer A., et al. Machine learning-based risk profile classification of patients undergoing elective heart valve surgery. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2021;60(6):1378–1385. doi: 10.1093/ejcts/ezab219
14. Shi H., Yang D., Tang K., et al. Explainable machine learning model for predicting the occurrence of postoperative malnutrition in children with congenital heart disease. *Clin Nutr.* 2022;41(1):202–210. doi: 10.1016/j.clnu.2021.11.006
15. Sweatt A.J., Hedlin H.K., Balasubramanian V., et al. Discovery of Distinct Immune Phenotypes Using Machine Learning in Pulmonary Arterial Hypertension. *Circ Res.* 2019;124(6):904–919. doi: 10.1161/CIRCRESAHA.118.313911
16. Anjewierden S., O'Sullivan D., Mangold K.E., et al. Detection of Right and Left Ventricular Dysfunction in Pediatric Patients Using Artificial Intelligence-Enabled ECGs. *J Am Heart Assoc.* 2024;13(21):e035201. doi: 10.1161/JAHA.124.035201
17. De Vries I.R., van Laar J.O.E.H., van der Hout-van der Jagt M.B., et al. Fetal electrocardiography and artificial intelligence for prenatal detection of congenital heart disease. *Acta Obstet Gynecol Scand.* 2023;102(11):1511–1520. doi: 10.1111/aogs.14623
18. Mayourian J., La Cava W.G., Vaid A., et al. Pediatric ECG-Based Deep Learning to Predict Left Ventricular Dysfunction and Remodeling. *Circulation.* 2024;149(12):917–931. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.123.067750
19. Rahman J., Brankovic A., Khanna S. Machine learning model with output correction: Towards reliable bradycardia detection in neonates. *Comput Biol Med.* 2024;177:108658. doi: 10.1016/j.combiomed.2024.108658
20. Mayourian J., van Bostel J.P.A., Sleeper L.A., et al. Electrocardiogram-Based Deep Learning to Predict Mortality in Repaired Tetralogy of Fallot. *JACC Clin Electrophysiol.* 2024;10(12):2600–2612. doi: 10.1016/j.jacep.2024.07.015
21. Chen C., Qin C., Qiu H., et al. Deep Learning for Cardiac Image Segmentation: A Review. *Front Cardiovasc Med.* 2020;7:25. doi: 10.3389/fcvm.2020.00025
22. Zhang G., Mao Y., Li M., et al. The Optimal Tetralogy of Fallot Repair Using Generative Adversarial Networks. *Front Physiol.* 2021;12:613330. doi: 10.3389/fphys.2021.613330
23. Aufiero S., Bleijendaal H., Robyns T., et al. A deep learning approach identifies new ECG features in congenital long QT syndrome. *BMC Med.* 2022;20(1):162. doi: 10.1186/s12916-022-02350-z
24. Siontis K.C., Liu K., Bos J.M., et al. Detection of hypertrophic cardiomyopathy by an artificial intelligence electrocardiogram in children and adolescents. *Int J Cardiol.* 2021;340:42–47. doi: 10.1016/j.ijcard.2021.08.026
25. Van Nieuwenhove E., Lagou V., Van Eyck L., et al. Machine learning identifies an immunological pattern associated with multiple juvenile idiopathic arthritis subtypes. *Ann Rheum Dis.* 2019;78(5):617–628. doi: 10.1136/annrheumdis-2018-214354
26. Eng S.W.M., Aeschlimann F.A., van Veenendaal M., et al. Patterns of joint involvement in juvenile idiopathic arthritis and prediction of disease course: A prospective study with multilayer non-negative matrix factorization. *PLoS Med.* 2019;16(2):e1002750. doi: 10.1371/journal.pmed.1002750
27. Ghosh P., Katkar G.D., Shimizu C., et al. An Artificial Intelligence-guided signature reveals the shared host immune response in MIS-C and Kawasaki disease. *Nat Commun.* 2022;13(1):4729. doi: 10.1038/s41467-022-32479-7
28. Mo X., Chen X., Li H., et al. Early and Accurate Prediction of Clinical Response to Methotrexate Treatment in Juvenile Idiopathic Arthritis Using Machine Learning. *Front Pharmacol.* 2019;10:1155. doi: 10.3389/fphar.2019.01155
29. Xue Y., Zhang J., Li C., et al. Machine learning for screening and predicting the risk of anti-MDA5 antibody in juvenile dermatomyositis children. *Front Immunol.* 2023;13:940802. doi: 10.3389/fimmu.2022.940802
30. Hu M., Shen C., Zheng F., et al. Clinical nomogram assisting in discrimination of juvenile dermatomyositis-associated interstitial lung disease. *Respir Res.* 2023;24(1):286. doi: 10.1186/s12931-023-02599-9
31. Gomez Hernandez M.P., Starman E.E., Davis A.B., et al. A distinguishing profile of chemokines, cytokines and biomarkers in the saliva of children with Sjögren's syndrome. *Rheumatology (Oxford).* 2021;60(10):4765–4777. doi: 10.1093/rheumatology/keab098
32. Poppenberg K.E., Jiang K., Li L., et al. The feasibility of developing biomarkers from peripheral blood mononuclear cell RNAseq data in children with juvenile idiopathic arthritis using machine learning approaches. *Arthritis Res Ther.* 2019;21(1):230. doi: 10.1186/s13075-019-2010-z

33. Van Leeuwen J.R., Penne E.L., Rabelink T. et al. Using an artificial intelligence tool incorporating natural language processing to identify patients with a diagnosis of ANCA-associated vasculitis in electronic health records. *Comput Biol Med.* 2024;168:107757. doi: 10.1016/j.combiomed.2023.107757
34. Goossens Q., Locsin M., Gharehbaghi S., et al. Knee acoustic emissions as a noninvasive biomarker of articular health in patients with juvenile idiopathic arthritis: a clinical validation in an extended study population. *Pediatr Rheumatol Online J.* 2023;21(1):59. doi: 10.1186/s12969-023-00842-7
35. Jone P.N., Gearhart A., Lei H., et al. Artificial Intelligence in Congenital Heart Disease: Current State and Prospects. *JACC Adv.* 2022;1(5):100153. doi: 10.1016/j.jaccadv.2022.100153
36. Hannun A.Y., Rajpurkar P., Haghanahi M., et al. Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network. *Nat Med.* 2019;25(1):65–69. doi: 10.1038/s41591-018-0268-3
37. Leone D.M., O'Sullivan D., Bravo-Jaimes K. Artificial Intelligence in Pediatric Electrocardiography: A Comprehensive Review. *Children (Basel).* 2024;12(1):25. doi: 10.3390/children12010025
38. Sarma K.V., Harmon S., Sanford T., et al. Federated learning improves site performance in multicenter deep learning without data sharing. *J Am Med Inform Assoc.* 2021;28(6):1259–1264. doi: 10.1093/jamia/ocaa341
39. Gichoya J.W., Banerjee I., Bhimoreddy A.R., et al. AI recognition of patient race in medical imaging: A modelling study. *Lancet Digit. Health* 2022;4(6):e406–e414. doi: 10.1016/S2589-7500(22)00063-2
40. Aiello M., Esposito G., Pagliari G., et al. How does DICOM support big data management? Investigating its use in medical imaging community. *Insights Imaging.* 2021;12(1):164. doi: 10.1186/s13244-021-01081-8
41. Van den Eynde J., Kutty S., Danford D.A., et al. Artificial intelligence in pediatric cardiology: Taking baby steps in the big world of data. *Curr Opin Cardiol.* 2022;37(1):130–136. doi: 10.1097/HCO.0000000000000927
42. Mohammadi I., Rajai Firouzabadi S., Hosseinpour M., et al. Using artificial intelligence to predict post-operative outcomes in congenital heart surgeries: a systematic review. *BMC Cardiovasc Disord.* 2024;24(1):718. doi: 10.1186/s12872-024-04336-6
43. Chou F.S., Ghimire L.V. Identification of prognostic factors for pediatric myocarditis with a random forests algorithm-assisted approach. *Pediatr Res.* 2021;90(2):427–430. doi: 10.1038/s41390-020-01268-7
44. Chou F.S., Ghimire L.V. Machine Learning for Mortality Prediction in Pediatric Myocarditis. *Front Pediatr.* 2021;9:644922. doi: 10.3389/fped.2021.644922
45. Ordine L., Canciello G., Borrelli F., et al. Artificial intelligence-driven electrocardiography: Innovations in hypertrophic cardiomyopathy management. *Trends Cardiovasc Med.* 2025;35(2):126–134. doi: 10.1016/j.tcm.2024.08.002
46. Kim K.J., Tagkopoulos I. Application of machine learning in rheumatic disease research. *Korean J Intern Med.* 2019;34(4):708–722. doi: 10.3904/kjim.2018.349
47. Mo X., Chen X., leong C., et al. Early Prediction of Clinical Response to Etanercept Treatment in Juvenile Idiopathic Arthritis Using Machine Learning. *Front Pharmacol.* 2020;11:1164. doi: 10.3389/fphar.2020.01164