

## Цифровая трансформация интерпретации электрокардиограммы у детей: от классических подходов до алгоритмов искусственного интеллекта

Н. В. Томчик, Н. С. Парамонова

Гродненский государственный медицинский университет, Гродно, Беларусь

Целью обзора является систематизация современных достижений в области регистрации электрокардиограммы, включая миниатюризацию устройств, беспроводные и цифровые технологии. Инновации расширили возможности для диагностики электрической нестабильности сердца у детей. Модернизация электрокардиографического оборудования, цифровая интеграция требуют переоценки ранее установленных педиатрических нормативов электрокардиограммы. Остается актуальной проблема интерпретации данных с носимых и событийных устройств регистрации электрокардиограммы в связи с тем, что большинство автоматических алгоритмов не адаптированы к физиологическим особенностям детского сердца. В детской кардиологии перспективным является направление использования инструментов искусственного интеллекта при интерпретации электрокардиограммы с целью скрининга и стратификации риска аритмий, структурных заболеваний сердца, каналопатий.

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, инновации, носимые и событийные устройства, искусственный интеллект.

The purpose of this review is to summarize current advances in electrocardiogram recording, including device miniaturization and wireless and digital technologies. Innovative engineering developments have expanded the capabilities for diagnosing cardiac electrical instability in children. Modernization of electrocardiographic equipment and digital integration require a reassessment of previously established pediatric electrocardiogram standards. The problem of interpreting data from wearable and event-based electrocardiogram recording devices remains pressing, as most automatic algorithms are not adapted to the physiological characteristics of the pediatric heart. In pediatric cardiology, the use of artificial intelligence tools in electrocardiogram interpretation is promising for screening and risk stratification of arrhythmias, structural heart diseases, and channelopathies.

**Key words:** electrocardiogram, innovations, wearable and event-based devices, artificial intelligence.

HEALTHCARE. 2026; 7: 67–75

DIGITAL TRANSFORMATION OF CHILDREN'S ELECTROCARDIOGRAM INTERPRETATION:  
FROM CLASSICAL APPROACHES TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

N. Tomchik, N. Paramonova

Технический прогресс в области диагностики электрической нестабильности сердца достиг высоких показателей. Это коснулось и методик, используемых в детской кардиологии. Электрокардиография остается одним из важнейших и простых методов диагностики аритмий, позволяющий верифицировать их топiku, электропатофизиологические характеристики [1; 2]. Традиционная электрокардиограмма (ЭКГ) регистрируется в 12 отведениях, представляет собой суммарный эффект трансмембранных потенциалов активированных клеток рабочего миокарда.

Разность потенциалов регистрируют путем использования различных отведений с поверхности тела, куда распространяются сердечные биоэлектрические токи, вследствие хорошей электропроводимости прилегающих к сердцу органов и тканей. Электрокардиография как метод была предложена А. Уоллером в 1887 г., в 1893 г. нидерландский ученый В. Эйнтховен ввел термин «электрокардиограмма» и предложил систему обозначения зубцов [2]. С тех пор произошла значительная эволюция в технологии регистрации электрической активности сердца [3; 4–6]. В настоящее время арсенал врача

включает инновационные методики для инвазивных и неинвазивных вмешательств [2; 4].

#### **Современный электрокардиограф: требования к регистрации**

Согласно современным стандартам, электрокардиограф – это аппарат с сетевым или внутренним источником питания, позволяющий регистрировать как минимум 12 традиционных отведений. Устройство обеспечивает передачу записи на дисплей, бумажный и другие внешние носители, осуществляет автоматический анализ информации, обладает высокой точностью цифро-аналогового преобразования и настройками (чувствительность сигнала, частотные фильтры, подавление сетевых помех, коррекция дрейфа изолинии, фильтрация мышечных артефактов) [7–9]. При регистрации ЭКГ с общепринятыми отведениями скорость записи должна составлять 25 мм/с или 50 мм/с, продолжительность записи должна быть не менее требуемой для алгоритмической обработки данных, в других случаях – не менее 20 с [7–9]. Масштаб традиционно составляет 10 мм/мВ. Чтобы избежать искажения в регистрации сегмента ST, комплекса QRS, требуется ограничение полосы пропускания нижних частот не выше 0,05 Гц, верхних частот – не ниже 100 Гц. Важным техническим компонентом электрокардиографа является фильтр [7; 8]. Режекторный фильтр позволяет устранить сетевую наводку, фильтр нижних частот (миографический фильтр) – элетромеханические движения, фильтр высоких частот (фильтр стабилизации изолинии) – низкочастотные помехи, дрейф изолинии. Грамотное включение этих фильтров позволяет избежать грубых ошибок. Включение фильтра нижних частот может уменьшать амплитуду зубцов комплекса QRS и даже искажать его форму, а фильтр высоких частот – исказить положение сегментов ST, PQ и TP, их наклон. Следовательно, высокие технические параметры современных электрокардиографов должны быть направлены на повышение качества регистрации сигнала у пациентов, в том числе детского возраста. Грамотное использование фильтров, частоты дискретизации и других параметров позволит добиться корректной записи ЭКГ.

Перед началом исследования очень важна настройка электрокардиографа, поскольку это способствует качественному графическому отображению сигнала [7; 8]. Например, у новорожденных и детей грудного возраста необходима высокая частота дискретизации (до 1000 Гц), так как на фоне коротких интервалов R-R комплексы QRS очень узкие и содержат высокочастотные компоненты, что может исказить их регистрацию. Не менее важ-

на величина полосы пропускания. Оптимальным значением считается 150–250 Гц, что позволяет заметно уменьшать искажение амплитуды QRS у грудных детей. Прибор с недостаточной полосой может занижать пики R и переоценивать относительную долю медленных компонентов. В работе J. Hirokawa и соавт. установлено, что амплитудные характеристики зубцов R и T на детской ЭКГ зависят от настроек фильтров [10]: в режиме низких частот фильтра высота зубца R была ниже ( $p = 0,013$ ,  $\eta^2 = 0,28$ ), а соотношение T/R было выше, чем соответствующие значения в режиме включения высоких частот ( $\chi^2 = 20,46$ ,  $p < 0,001$ ). То есть зубец T кажется нереально высоким по сравнению с комплексом QRS, хотя реальные изменения у ребенка отсутствуют.

#### **Техническое усовершенствование электрокардиографов и нормативные значения электрокардиограммы у детей**

Первые упоминания о нормативных значениях интервалов и зубцов ЭКГ у детей появились в середине XX в. Среди них белорусский ученый, профессор, основатель детской кардиологии в Беларуси Р. Э. Мазо. В 1957 г. ею была опубликована работа о нормативных значениях ЭКГ в разных возрастных группах [11]. Технические характеристики электрокардиографов советского времени имели свои особенности. Они кардинально отличались от параметров современных приборов, а значит, полученные результаты необходимо было трактовать, учитывая специфику оборудования. Усиленный электрический сигнал сердца регистрировался с помощью гальванометра и писчего пера без цифровой обработки, поэтому рассматривать понятие «частота дискретизации» в электрокардиографе не представлялось возможным. В более поздних моделях регистраторов ЭКГ этот показатель составлял 150–160 Гц. Как известно, такая частота дискретизации недостаточна для ЭКГ у маленьких детей. Большинство современных регистраторов ЭКГ работают с частотой дискретизации 500 Гц или выше, что позволяет точно фиксировать форму зубцов, их амплитуду и интервальные характеристики [13].

В зарубежной литературе публикации о нормативных значениях ЭКГ у детей впервые были опубликованы в 1970-х гг. и принадлежат A. Davignon, также P. Rautaharju и соавт. [12; 13]. Однако при практическом применении этих данных следует учитывать некоторые ограничения, обусловленные рядом причин, в том числе технических. В частности, в исследованиях указанных авторов ЭКГ-сигнал был оцифрован с частотой дискретизации 333 Гц.

При такой низкой частоте регистратора возможно пропустить начало или пик зубца, особенно у детей раннего возраста.

В 2001 г. Р. Р. Rijnbeek и соавт. опубликовали таблицы новых нормативных значений для детской ЭКГ. В роттердамском исследовании приняли участие 1912 здоровых детей, использовалось современное цифровое оборудование [14]. Благодаря высокой частоте дискретизации, шумозащищенности электрического сигнала установлены различия амплитудных характеристик некоторых зубцов и интервалов по сравнению с ранее выполненными. Выявлено, что абсолютные значения амплитуд зубцов R и S в грудных отведениях выше, часто значительно, по сравнению с исследованием A. Davignon [15]. Например, верхний предел амплитуды зубца R в отведении  $V_6$  в возрастной группе 12–16 лет составлял 3,05 мВ (Р. Р. Rijnbeek) по сравнению с 2,3 мВ (A. Davignon). По данным Р. Р. Rijnbeek у здоровых детей в возрасте от 6 мес. до 3 лет амплитуда зубца Q в отведении III была 0,6–0,8 мВ, в то время как это показатель составлял 0,55–0,65 мВ, по сведениям A. Davignon.

В 2018–2020 гг. E. Saarel и соавт., A. Bratincsak и соавт., проанализировав цифровые ЭКГ больших когорт, выявили существенное влияние пола и расы на параметры ЭКГ [16; 17]. Исследование E. Saarel и соавт. продемонстрировало, что скорректированный интервал QT во II отведении был больше у девочек по сравнению с таковым показателем у мальчиков в возрастной группе 3 года и старше ( $p \leq 0,03$ ) и у белокожих по сравнению с чернокожими в возрастной группе 12 лет и старше ( $p < 0,05$ ) [16]. Амплитуда зубца R в отведении  $V_6$  была больше у мальчиков по сравнению с таковым показателем у девочек в возрастной группе 12 лет и старше ( $p < 0,001$ ), у чернокожих по сравнению с белокожими в возрастной группе 3 года и старше ( $p \leq 0,006$ ). Результатом исследования A. Bratincsak стали разработанные нормативные стандарты для 102 параметров ЭКГ, включая частоту сердечных сокращений; электрические оси зубца P, комплекса QRS и зубца T; угол между электрическими осями комплекса QRS и зубца T; интервал PR, длительность QRS, интервал QT и скорректированный QTc; амплитуды P, Q, R, S и T в 12 отведениях, а также интегралы QRS и зубец T [17]. Были рассчитаны значения Z-баллов в диапазоне от -2,5 до 2,5 для установления верхнего и нижнего пределов нормы [18].

Коллегами из России было проведено исследование, результатом которого стало методическое руководство Л. М. Макарова и соавт. «Норматив-

ные значения ЭКГ у детей» (2018) [19]. Предложенные референсные интервалы анализировали, исходя только из половозрастных различий [20]. Выявлена тенденция к более длительному QTc у детей бурятской популяции по сравнению с европейцами, однако для подтверждения межэтнических различий нужны масштабные исследования.

Таким образом, стандарты нормальных значений, помогающие в интерпретации ЭКГ у детей, существуют уже много лет. Недавние исследования показывают, что некоторые из этих стандартов следует пересмотреть и, возможно, скорректировать с учетом изменений в электрокардиографическом оборудовании и возможных физиологических изменений у детей, которые могли произойти с момента установления первоначальных стандартов.

#### **Смарт-устройства для регистрации электрокардиограммы у детей**

Современная медицина активно ищет новые методы регистрации электрокардиограммы [21; 22]. Эта ситуация обусловлена рядом причин. Во-первых, это комфорт для пациента. Например, традиционные электроды с гелем нередко пугают ребенка раннего возраста, вследствие чего затруднен психологический контакт во время процедуры. Врачи-неонатологи и педиатры говорят о неудобстве многочисленных проводов и датчиков при уходе за новорожденным, особенно за недоношенным, находящимся в кувезе, о появлении петехиальных или экхимозных пятен в зоне контакта с металлизированными грудными электродами вследствие воздействия давления на нежную кожу ребенка. Во-вторых, это сложности в фиксировании кратковременных и редких эпизодов аритмии, в проведении дифференциальной диагностики необъяснимых липотимических состояний у детей.

В начале XXI в. появляются беспроводные устройства с интегрированными электродами. Ключевым преимуществом «умного» пластыря/патча стало отсутствие проводов, что улучшило психологические аспекты переносимости процедуры пациентами [23–26]. Современные модели фиксируются на грудную клетку, устойчивы к влаге, при проведении исследования возможны занятия спортом и водные процедуры. Такие устройства обычно обеспечивают непрерывную одноканальную запись электрокардиограммы до 14 сут. и хорошо переносятся детьми.

Параллельно с другими инновациями развивается направление, основанное на использовании электропроводящих материалов (жидких металлов, наночастиц, полимеров или гидрогелей) [24–30].

По данным исследования Y. Yu и соавт., появляются биоэлектроды с использованием галлия, продемонстрировавшие качество записи электрокардиограммы, сопоставимой с традиционной записью [27].

Однако добиться высокоточной регистрации с помощью биоэлектродов оставалось сложной задачей ввиду индивидуальных особенностей кожи и необходимости плотного контакта, в том числе в условиях повседневной двигательной активности человека. Для решения поставленной задачи стали использовать гидрогелевый электрод, сформированный *in situ*. Ввиду особо плотного контакта с кожей он позволял получать электрический сигнал на 88 % качественнее, чем с гелевыми хлорсеребряными электродами (Ag/AgCl) [28]. Пилотные исследования в этом направлении с участием специалистов в области биоинженерии продолжаются. Нанесение миниатюрных микросхем, беспроводных датчиков на гибкую основу в виде пластыря с целью получения качественной регистрации электрокардиограммы в режиме реального времени поможет детям из группы высокого риска своевременно заподозрить предикторы нарушений сердечного ритма и, соответственно, определить маршрутизацию пациента.

Современные кардиологи также используют ЭКГ-рекордер, обеспечивающий регистрацию электрокардиограммы, работающий по принципу записи «по требованию» [31; 32]. Такой прибор активирует сам пациент во время появления у него симптомов. Эффективность метода во многом определяется способностью выполнить активацию записи с последующей передачей данных врачу для интерпретации. Эти устройства не требуют подключения проводов и активируются прикосновением пальцев или наложением на грудную клетку. Полученная запись отображается в мобильном приложении. Однако при бессимптомном течении аритмии эффективность использования данной технологии снижается. Наиболее рационально использование таких устройств в случаях редких и трудноуловимых эпизодов нарушений ритма или липотимических состояний, когда другие методы диагностики оказываются недостаточно информативными.

Достижения в области регистрации ЭКГ позволили существенно миниатюризировать устройства, повысить комфорт пациентов педиатрического профиля и расширить возможности длительного амбулаторного мониторинга. Однако не решена проблема корректности при интерпретации полученных данных, так как большинство алгоритмов не адаптированы к возрастным физиологическим

особенностям работы сердца ребенка. В настоящее время имеющиеся системы ограничиваются количественной оценкой интервалов ЭКГ, что снижает достоверность сформированного заключения и требует обязательной врачебной интерпретации.

#### **Инструменты искусственного интеллекта для интерпретации электрокардиограммы у детей**

Искусственный интеллект (ИИ) совершает революцию в здравоохранении, внедряя инновационные решения в диагностику, лечение и ведение пациентов [33]. В детской кардиологии применение ИИ для трактовки данных ЭКГ с целью повышения точности диагностики, ускорения рабочих процессов и улучшения результатов лечения пациентов является новым направлением. Учитывая, что интерпретация детской ЭКГ вызывает сложности, использование возможностей ИИ потенциально может помочь в решении этой проблемы. Исследования у взрослых с помощью методик ИИ продемонстрировали эффективность при дистанционном мониторинге для выявления фибрилляции предсердий и других аритмий. Имея некоторый опыт, начаты работы в отношении анализа ЭКГ и использования ИИ для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний у детей.

На базе PubMed D. M. Leone и соавт. выполнили отбор 17 наблюдений из 107 рецензируемых статей по проблеме использования ИИ и интерпретации ЭКГ в педиатрической практике [34]. Установлено, что первые публикации об использовании ИИ выполнены L. Edenbrandt и R. Rittner в 1998 г. и посвящены выявлению случаев неправильного наложения электродов [35]. В исследовании с участием 1908 пациентов авторы констатировали, что ИИ способен с высокой точностью обнаруживать ошибки при наложении электродов на конечностях (AUROC (площадь под ROC-кривой) = 0,999).

Следующий пик работ приходится на 2020-е гг., причем многие из них посвящены прогнозированию выявления дефекта межпредсердной перегородки у детей с использованием разных инструментов ИИ. Описана уникальная работа I. R. de Vries и соавт. по прогнозированию врожденных пороков сердца на основе ЭКГ плода на выборке 122 диад «мать – плод» [36]. Используя абдоминальные электроды у матери, они отфильтровали сигналы материнской ЭКГ и обучили нейронную сеть. Алгоритм показал умеренные результаты с AUROC = 0,76. Кроме того, в литературе описаны исследования по выявлению манифестного синдрома предвозбуждения желудочков и латентного синдрома удлинённого QT у детей.

Успех катетерной абляции зависит от места локализации дополнительных путей. В связи с этим ключевой задачей современной аритмологии является определение локализации дополнительных атриовентрикулярных путей у детей с рецидивирующим характером гемодинамически значимых аритмий на фоне синдрома Вольфа – Паркинсона – Уайта. Существующие алгоритмы с использованием традиционной ЭКГ несовершенны, поскольку возможно влияние субъективного фактора при интерпретации данных. М. Nishimori и соавт. разработали модель с использованием инструментов ИИ, данных ЭКГ и рентгенографии грудной клетки [37]. Она оказалась значительно точнее, чем традиционный алгоритм принятия решений о локализации дополнительных путей. Мультимодальная модель комбинации данных ЭКГ и рентгенографии грудной клетки позволили эффективно определить передне-заднее положение дополнительных путей (таблица).

Несмотря на предпринятые попытки, до сих пор не решены проблемы прогнозирования неблагоприятных событий при синдроме удлиненного QT, особенно его латентных вариантов. Успешные результаты с использованием анализа ЭКГ и ИИ получены J. Vos и соавт. [38]. В исследование были включены пациенты с подтвержденным клиническим и/или генетическим диагнозом синдрома удлиненного интервала QT 1-го, 2-го или 3-го типа (LQT1, LQT2 или LQT3) и пациенты, обратившиеся в связи с подозрением на синдром удлиненного интервала QT, но выписанные без этого диагноза. Авторами создана скрининговая («прогенетическая») модель, позволившая различать пациентов с электрокардиографически латентным синдромом удлиненного интервала QT с 80%-й точностью прогнозирования генотипа LQTS.

С помощью специального класса глубоких нейронных сетей Y. Nogimori и соавт. анализу ЭКГ были обучены сверхточные нейронные сети (CNN) [39]. На основе результатов ЭКГ 21 378 детей получены предикторы прогнозирования неблагоприятных сердечно-сосудистых событий у 8324. Выходные данные полученной модели сравнивали с моделью с использованием биомаркера натрийуретического пептида В-типа (BNP). Сравнительный анализ показал, что модель с использованием ИИ для анализа ЭКГ продемонстрировала значительно лучшие параметры, чем модель с биомаркером BNP ( $p = 0,03$ ). Авторы считают, что CNN, полученная на основе ЭКГ, является новым маркером сердечной недостаточности с иным прогностическим потенциалом, чем BNP.

Имеются сведения о моделях прогноза гипертрофической кардиомиопатии. На ЭКГ заболевание можно заподозрить при наличии признаков гипертрофии левого желудочка, отклонения электрической оси влево, глубокого зубца Q, инверсии зубца T; нередко электрокардиографические отклонения носят неспецифический характер. Безусловно, трансторакальная эхокардиография является одним из ведущих диагностических методов, однако на этапах бессимптомного течения данный метод широко не используется. В связи с этим наиболее перспективным скрининговым методом является ЭКГ.

К. С. Siontis и соавт. разработали модель, прогнозирующую вероятность гипертрофической кардиомиопатии у детей с чувствительностью 92 % и специфичностью 95 % [40]. Модель была апробирована в разных возрастных группах и продемонстрировала улучшение эффективности с увеличением возраста. AUROC теста в возрастной подгруппе до 5 лет составила 0,93, от 15 до 18 лет – 0,99. Данная модель прогнозирования гипертрофической кардиомиопатии с использованием инструментов ИИ и ЭКГ отличается тем, что предлагается подход без привязки к традиционным критериям гипертрофии левого желудочка.

Таким образом, применение моделей глубокого обучения ИИ в сочетании с доступностью больших массивов ЭКГ и клинических данных позволило выявлять заболевания по ЭКГ с точностью, ранее недостижимой для традиционных технологий или врача функциональной диагностики/кардиолога. Результаты использования ЭКГ с ИИ в педиатрической практике обнадеживают, поскольку они значительно превосходят существующие модели скрининга для некоторых болезней. Ценность инструментов ИИ особенно важна для выявления бессимптомных сердечно-сосудистых заболеваний, которые могут быть незаметны даже для опытных специалистов.

### Заключение

Технологический прогресс в области регистрации и интерпретации ЭКГ существенно расширил возможности диагностики в детской кардиологии. Модернизация электрокардиографического оборудования, цифровая интеграция требуют переоценки ранее установленных нормативов. Развитие беспроводных устройств и биоэлектродов значительно повысило комфорт у детей при исследовании электрической активности сердца, расширило возможности амбулаторного мониторинга.

Возможности применения инструментов искусственного интеллекта при анализе электрокардиограммы у детей  
Possibilities of using artificial intelligence tools in analyzing electrocardiograms in children

| Модель ИИ-ЭКГ                                                                                                                 | Авторы, год                          | Инструменты | Используемые данные                                    | Количество пациентов                       | Показатель результативности                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Прогнозирование дефекта межпредсердной перегородки                                                                            | H. Mori, 2021                        | CNN, LTSMs  | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 728                                        | Внутренний показатель AUROC = 0,95, F1 – 0,81                                                                                     |
| Прогнозирование дефекта межпредсердной перегородки                                                                            | J. Mayourian, 2023                   | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 46 261                                     | Внутренний показатель AUROC = 0,84, показатель AUPRC = 0,46                                                                       |
| Прогнозирование синдрома удлиненного QT                                                                                       | J. M. Bos, 2021                      | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 2059                                       | Внутренний показатель AUROC = 0,90 (95% ДИ (0,88–0,93)), F1 – 0,84                                                                |
| Определение локализации дополнительных проводящих путей при синдроме WPW с использованием рентгенографии грудной клетки и ЭКГ | M. Nishimori, 2021                   | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей и рентгенограмма грудной клетки | 294 с синдромом WPW и 1519 контрольных лиц | Средняя точность – 0,80, F1 – 0,88                                                                                                |
| Определение локализации дополнительных проводящих путей при синдроме WPW                                                      | J. Hennecker, 2025                   | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 567                                        | AUROC = 0,92 (95% ДИ (0,88–0,96))                                                                                                 |
| Прогнозирование гипертрофической кардиомиопатии                                                                               | K. C. Siontis, 2021                  | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 300                                        | Внутренний показатель AUROC = 0,98, специфичность – 0,95                                                                          |
| Прогнозирование бивентрикулярной дисфункции                                                                                   | S. Anjewierden и D. O'Sullivan, 2023 | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей                                 | 10 142 ЭКГ                                 | Дисфункция левого желудочка: AUROC = 0,93, специфичность – 0,89. Дисфункция правого желудочка: AUROC = 0,90, специфичность – 0,80 |
| Прогнозирование пренатально врожденных пороков сердца у плода                                                                 | I. R. de Vries, 2023                 | CNN         | ЭКГ плода (абдоминальные электроды)                    | 122                                        | Внутренний показатель AUROC = 0,76–0,78                                                                                           |
| Прогнозирование гипоксического поражения сердечно-сосудистой системы у плода по уровню стресса у беременной                   | P. Sarkar, 2021                      | CNN         | ЭКГ плода (абдоминальные электроды)                    | 210 диад «мать – плод»                     | Внешний показатель AUROC = 0,98, специфичность – 0,982                                                                            |
| Прогнозирование неблагоприятных сердечно-сосудистых событий с использованием биомаркера BNP                                   | Y. Nogimori, 2024                    | CNN         | 12-канальная ЭКГ детей и уровни BNP                    | 8324 ЭКГ                                   | AUROC = 0,826 (95 % ДИ (0,706–0,945)), специфичность – 0,655                                                                      |

Примечание: LSTM – сети долгой краткосрочной памяти; F1 – гармоничное среднее между точностью и полнотой; AUPRC – площадь под кривой «точность – полнота»; синдром WPW – синдром Вольфа – Паркинсона – Уайта.

Однако, несмотря на успешное использование этих технологий, необходима разработка четких алгоритмов интерпретации с учетом возрастных особенностей детского сердца. Использование носимых и имплантируемых устройств для записи ЭКГ, таких как умные часы, пластыри, фитнес-браслеты, рекордеры, позволяют регистрировать, хранить, передавать на расстояние, анализировать и интерпретировать полученные результаты. Внедрение

инструментов ИИ в интерпретацию ЭКГ у детей демонстрирует высокую диагностическую точность при раннем выявлении аритмий, структурных заболеваний сердца, каналопатий. Модели глубокого обучения ИИ обеспечивают возможности раннего скрининга и стратификации риска, в том числе при бессимптомном течении болезни. Технологии использования ИИ в детской кардиологии находятся на этапах становления и успешного развития.

## Литература

1. Arrhythmias in pediatric age : a narrative review / A. Strango, J. Ielahi, J. Sabotino [et al.] // *Chidren (Basel)*. – 2025. – Vol. 12, № 12. – doi:10.3390/children12121580.
2. Friedman, P. A. The Electrocardiogram at 100 years: history and future / P. A. Friedman // *Circulation*. – 2024. – Vol. 149, № 6. – P. 411–413.
3. Deep learning and the electrocardiogram : review of the current state-of-the-art / S. Somani, A. J. Russak, F. Richter [et al.] // *Europace*. – 2021. – Vol. 23, № 8. –doi: 10.1093/europace/euab377.
4. 2017 ISHNE-HRS expert consensus statement on ambulatory ECG and external cardiac monitoring/telemetry / J. S. Steinberg, N. Varma, I. Cygankiewicz [et al.] // *Heart Rhythm*. – 2017. – Vol. 14, № 7. – doi:10.1016/j.hrthm.2017.03.38.
5. Kumthekar, R. N. Recent advancements in cardiac implantable devices for pediatric patients / R. N. Kumthekar, T. S. Howard // *Current Pediatrics Reports*. – 2024. – Vol. 12, № 4. – P. 147–157.
6. Joannou, K. Ambulatory electrocardiography: the contribution of Norman Jefferis Holter / K. Joannou, M. Ignaszewski, J. Macdonald // *British Columbia Medical Journal*. – 2014. – Vol. 56, № 2. – P. 86–89.
7. Practical guide to ECG device performance testing according to international standards / E. Raus-Jarabek, M. Czerw, A. Skowronek [et al.] // *Electronics*. – 2025. – Vol. 14, № 19. – doi: 10.3390/electronics14193878.
8. A novel method for conformity assessment testing of electrocardiographs for post-market surveillance purposes / A. Badnjevi, R. Magjarevic, E. Mrdjanovic, L. G. Pokvic // *Technology and Health Care*. – 2023. – Vol. 31. – P. 307–315.
9. Home use : technological and clinical scoping review / A. Zepeda-Echavarria, R. R. van Leur, M. van Sleuwen [et al.] // *Journal of Medical Internet Research Cardio*. – 2023. – Vol. 7. – doi: 10.2196/44003.
10. The influence of electrocardiogram (ECG) filters on the heights of R and T waves in children / J. Hirokawa, T. Hitosugi, Y. Miki [et al.] // *Scientific Reports*. – 2022. – Vol. 12, № 1. – doi:10.1038/s41598-022-17680-4.
11. Мазо, Р. Э. Особенности электрокардиограммы здоровых детей разных возрастов / Р. Э. Мазо. – Мн. : Гиз БССР, 1957. – 108 с.
12. Diskinson, D. F. The normal ECG in childhood and adolescence / D. F. Diskinson // *Heart*. – 2005. – Vol. 91, № 12. – doi: 10.1136/hrt.2004.057307.
13. Guidelines for the interpretation of the neonatal electrocardiogram. A task force of the European Society of Cardiology / P. J. Schwartz, A. Jr. Garson, T. Paul [et al.] // *European Heart Journal*. – 2002. – Vol. 23, № 17. – doi:10.1053/euhj.2002.3274.
14. New normal limits for the paediatric electrocardiogram / P. R. Rijnbeek, M. Witsenburg, E. Schrama [et al.] // *European Heart Journal*. – 2001. – Vol. 22, № 8. – P. 702–711.
15. Normal ECG standards for infants and children / A. Davignon, E. Rautaharju, E. Boisselle [et al.] // *Pediatric Cardiology*. – 1980. – Vol. 1, № 2 – P. 123–131. – doi:10.1007/BF02083144.
16. Electrocardiograms in healthy north american children in the digital age / E. V. Saarel, S. Granger, R. J. Kaltman [et al.] // *Circulation. Arrhythmia and Electrophysiology*. – 2018. – Vol. 11, № 7. – doi: 10.1161/circep.117.005808.
17. Electrocardiogram standards for children and young adults using Z-Scores / A. Bratincsak, Ch. Kimata, B. N. Limm-Chan [et al.] // *Circulation. Arrhythmia and Electrophysiology*. – 2020. – Vol. 13, № 8. – doi: 10.1161/circep.119.008253.
18. The electrocardiogram is a poor diagnostic tool to detect left ventricular hypertrophy in children: a comparison with echocardiographic assessment of left ventricular mass / A. Bratincsak, M. Williams, Ch. Kimata, J. C. Perry // *Congenital Heart Disease*. – 2015. – Vol. 10, № 4. – doi: 10.1111/chd.12249.
19. Регистрация электрокардиограммы покоя в 12 общепринятых отведениях взрослыми детям : метод. рекомендации / Д. В. Дроздов, Л. М. Макаров, В. С. Баркан [и др.] // *Российский кардиологический журнал*. – 2023. – Т. 28, № 10. – С. 105–130.
20. Новые нормы и интерпретации детской электрокардиограммы / Л. М. Макаров, И. И. Киселева, В. Н. Коломятова, Н. Н. Федина // *Педиатрия*. – 2015. – Т. 94, № 2. – С. 63–68.
21. Hitt, J. R. Patch versus traditional ambulatory ECG monitoring in children / J. R. Hitt, E. Carter, J. May // *Progress in Pediatric Cardiology*. – 2021. – Vol. 63, № 1. – doi: 1016/j.ppedcard.2021.101408.
22. Feasibility and diagnostic value of recording smartwatch electrocardiograms in neonates and children / J. Leroux, M. Strik, F. D. Ramiez [et al.] // *The Journal of Pediatrics*. – 2023. – Vol. 253. – P. 40–45.
23. Ambulatory arrhythmia detection with ZIO XT patch in pediatric patients: a comparison of devices / S. Pradhan, J. A. Robinson, J. K. Shivapour, Ch. S. Snyder // *Pediatric cardiology*. – 2019. – Vol. 40, № 5. – P. 921–924.
24. Cardiac arrhythmia detection outcomes among patients monitored with the Zio patch system : a systematic literature review / M. Yenikomshian, J. Jarvis, C. Patton [et al.] // *Current Medical Research and Opinion*. – 2019. – Vol. 35, № 10. – doi: 10.1080/03007995.2019.1610370.

25. Effect of a home-based wearable continuous ECG monitoring patch on detection of undiagnosed atrial fibrillation : the mSToPS randomized clinical trial / S. R. Steinhubl, J. Waalen, A. M. Edwards [et al.] // *Journal of the American Medical Association*. – 2018. – Vol. 320, № 2. – P. 146–155.
26. A flexible, wearable, and wireless biosensor patch with internet of medical things applications / D. T. Phan, C. H. Nguyen, T. D. P. Nguyen [et al.] // *Biosensors (Basel)*. – 2022. – Vol. 12, № 3. – doi: 10.3390/bios12030139.
27. Yu, Y. Biomedical implementation of liquid metal ink as drawable ECG electrode and skin circuit / Y. Yu, J. Zhang, J. Liu // *Public Library of Science one*. – 2013. – Vol. 8, № 3. – doi:10.1371/journal.pone.0058771.
28. Chen, J. X. M. Conductive bio-based hydrogel for wearable electrodes via direct ink writing on skin / J. X. M. Chen, Y. Zhang, T. Chen [et al.] // *Advanced Functional Materials*. – 2024. – Vol. 34, № 40. – doi:10.1002/adfm.202403721.
29. A highly conductive and stretchable wearable liquid metal electronic skin for long-term conformable health monitoring / R. Guo, X. Wang, Yu WenZhao [et al.] // *Science China Technological Sciences*. – 2018. – Vol. 61, № 7. – doi:10.1007/s11431-018-9253-9.
30. A non-newtonian liquid metal enabled enhanced electrography / V. Timosina, T. Cole, H. Lu [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. – 2023. – Vol. 235. – doi:10.1016/j.bios.2023.115414.
31. Using a cardiac event recorder in children with potentially arrhythmia-related symptoms / M. Saygi, Y. Ergul, I. Ozyilmaz [et al.] // *Annals of noninvasive electrocardiology*. – 2016. – Vol. 21, № 5. – doi: 10.1111/anec.12339.
32. Use of AliveCor Kardia Mobile in the detection of supraventricular tachycardia in a pediatric population / A. Shahrier, G. L. Hackett, J. Cowen [et al.] // *Pediatrics*. – 2021. – Vol. 147, № 3. – doi: 10.1542/peds.147.3MA1.24.
33. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm : a retrospective analysis of outcome prediction / Z. I. Attia, P. Noseworthy, F. Lopez-Jimenez [et al.] // *Lancet*. – 2019. – Vol. 394. – P. 861–867.
34. Leone, D. M. Artificial intelligence in pediatric electrocardiography : a comprehensive review / D. M. Leone, D. O'Sullivan, K. Bravo-Jaimes // *Children (Basel)*. – 2024. – Vol. 12, № 1. – doi: 10.3390/children12010025.
35. Edenbrandt, L. Recognition of lead reversals in pediatric electrocardiograms / L. Edenbrandt, R. Rittner // *The American Journal of Cardiology*. – 1998. – Vol. 82, № 10. – doi: 10.1016/S0002-9149(98)00621-3.
36. Fetal electrocardiography and artificial intelligence for prenatal detection of congenital heart disease / I. R. de Vries, J. O. E. H. van Laar, M. B. van der Hout-van der Jagt [et al.] // *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica*. – 2023. – Vol. 102, № 11. – doi: 10.1111/aogs.14623.
37. Accessory pathway analysis using a multimodal deep learning model / M. Nishimori, K. Kiuchi, K. Nishimori [et al.] // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11, № 1. – doi: 10.1038/s41598-021-87631-y.
38. Use of artificial intelligence and deep neural networks in evaluation of patients with electrocardiographically concealed long QT syndrome from the surface 12-lead electrocardiogram / J. M. Bos, I. Zach, D. E. Albert [et al.] // *JAMA Cardiology*. – 2021. – Vol. 6, № 5. – P. 532–538.
39. Prediction of adverse cardiovascular events in children using artificial intelligence-based electrocardiogram / Y. Nogimori, K. Sato, K. Takamizawa [et al.] // *International Journal of Cardiology*. – 2024. – Vol. 406. – doi: 10.1016/j.ijcard.2024.132019.
40. Detection of hypertrophic cardiomyopathy by an artificial intelligence electrocardiogram in children and adolescents / K. C. Siontis, K. Liu, J. M. Bos [et al.] // *International Journal of Cardiology*. – 2021. – Vol. 340. – P. 42–47.

## References

1. Strango A., Ielahi J., Sabotino J. Arrhythmias in pediatric age. *Chidren (Basel)*. 2025; 12(12): 8–19. doi:10.3390/children12121580.
2. Friedman P.A. The Electrocardiogram at 100 years: history and future. *Circulation*. 2024; 149: 411–413.
3. Somani S., Russak A.J., Richter F., et al. Deep learning and the electrocardiogram. *Europace*. 2021; 23(8). doi: 10.1093/europace/uaa377.
4. Steinberg J.S., Varma N., Cygankiewicz I., et al. 2017 ISHNE-HRS expert consensus statement on ambulatory ECG and external cardiac monitoring/telemetry. *Heart Rhythm*. 2017; 14(7). doi:10.1016/j.hrthm.2017.03.38.
5. Kumthekar R.N., Howard T.S. Recent advancements in cardiac implantable devices for pediatric patients. *Curr Pediatr Rep*. 2024; 12: 147–157.
6. Joannou K., Jgnaszewski M., Macdonald J. Ambulatory electrocardiography: the contribution of Norman Jefferis Holter. *BCM J*. 2014; 56(2): 86–89.
7. Raus-Jarabek E., Czerw M., Skowronek A., et al. Practical guide to ecg device performance testing according to international standards. *Electronics*. 2025; 14(19). doi: 10.3390/electronics14193878.
8. Badnjevi A., Magjarevic R., Mrdjanovic E., Pokvic L.G. A novel method for conformity assessment testing of electrocardiographs for post-market surveillance purposes. *Technol Health Care*. 2023; 31: 307–315. doi: 10.3233/THC-229006.
9. Zepeda-Echavarria A., van Leur R. R., van Sleuwen M., et al. Home use. *JMIR Cardio*. 2023; 7. doi: 10.2196/44003.
10. Hirokawa J., Hitosugi T., Miki Y., et al. The influence of electrocardiogram (ECG) filters on the heights of R and T waves in children. *Sci Rep*. 2022; 2(12). doi:10.1038/s41598-022-17680-4.
11. Mazo R.E. Electrocardiographic features of healthy children of different ages. Minsk: Giz BSSR; 1957. 108. (in Russian)
12. Diskinson D.F. The normal ECG in childhood and adolescence. *Heart*. 2005; 91(12). doi: 10.1136/hrt.2004.057307.
13. Schwartz P.J., Garson A.Jr., Paul T., et al. Guidelines for the interpretation of the neonatal electrocardiogram. *Eur Heart J*. 2002; 23(17). doi:10.1053/ehj.2002.3274.
14. Rijnbeek P.R., Witsenburg M., Schrama E., et al. New normal limits for the paediatric electrocardiogram. *Eur Heart J*. 2001; 22(8): 702–711.
15. Davignon A., Rautaharju P., Boisselle E., et al. Normal ECG standards for infants and children. *Pediatr Cardiol*. 1980; 1(2): 123–131. doi:10.1007/BF02083144.
16. Saarel E.V., Granger S., Kaltman R. J., et al. Electrocardiograms in healthy north american children in the digital age. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2018; 11(7). doi: 10.1161/circep.117.005808.
17. Bratinscak A., Kimata Ch., Limm-Chan B.N., et al. Electrocardiogram standards for children and young adults using Z-Scores. *Circ Arrhythm Electrophysiol*. 2020; 13(8). doi: 10.1161/circep.119.008253.



18. Bratincsak A., Williams M., Kimata Ch, Perry J.C. The Electrocardiogram is a poor diagnostic tool to detect left ventricular hypertrophy in children: a comparison with echocardiographic assessment of left ventricular mass. *Congenit Heart Dis.* 2015; 10 (4). doi: 10.1111/chd.12249.
19. Drozdov D.V., Makarov L.M., Barkan V.S., et al. Registration of a resting electrocardiogram in 12 generally accepted leads by adults and children. *Rossiiskij kardiologicheskij zhurnal.* 2023; 28(10): 105–130. (in Russian)
20. Makarov L.M., Kiseleva I.I., Komolyatova V.N., Fedina N.N. New norms and interpretations of a pediatric electrocardiogram. *Pediatriya.* 2015; 94(2): 63–68. (in Russian)
21. Hitt J.R., Carter E., May J. Patch versus traditional ambulatory ECG monitoring in children. *Prog Pediatr Cardiol.* 2021; 63(1). doi: 10.1016/j.pppedcard.2021.101408.
22. Leroux J., Strik M., Ramirez F.D., et al. Feasibility and diagnostic value of recording smartwatch electrocardiograms in neonates and children. *J Pediatr.* 2023; 253: 40–45.
23. Pradhan S., Robinson J.A., Shivapour J.K., Snyder Ch.S. Ambulatory arrhythmia detection with ZIO XT patch in pediatric patients: a comparison of devices. *Pediatr Cardiol.* 2019; 40(5): 921–924.
24. Yenikomshian M., Jarvis J., Patton C., et al. Cardiac arrhythmia detection outcomes among patients monitored with the Zio patch system. *Curr Med Res Opin.* 2019; 35(10). doi: 10.1080/03007995.2019.1610370.
25. Steinhilbl S.R., Waalen J., Edwards A.M., et al. Effect of a home-based wearable continuous ECG monitoring patch on detection of undiagnosed atrial fibrillation. 2018; 320(2): 146–155.
26. Phan D.T., Nguyen C.H., Nguyen T.D.P., et al. A flexible, wearable, and wireless biosensor patch with internet of medical things applications. *Biosensors (Basel).* 2022; 12(3). doi: 10.3390/bios12030139.
27. Yu Y., Zhang J., Liu J. Biomedical implementation of liquid metal ink as drawable ECG electrode and skin circuit. *PLOS one.* 2013; 8(3). doi:10.1371/journal.pone.0058771.
28. Chen J.X.M., Zhang Y., Chen T. Conductive bio-based hydrogel for wearable electrodes via direct ink writing on skin. *Advanced Functional Materials.* 2024; 34(40). doi:10.1002/adfm.202403721.
29. Guo R., Wang X., Tang J. A highly conductive and stretchable wearable liquid metal electronic skin for long-term conformable health monitoring. *Science China Technological Sciences.* 2018; 61(7). doi: 10.1007/s11431-018-9253-9.
30. Timosina V., Cole T., Lu H., et al. A non-newtonian liquid metal enabled enhanced electrography. *Biosensors and Bioelectronics.* 2023; 235. doi: 10.1016/J. bios.2023.115414.
31. Saygi M., Ergul Y., Ozyilmaz I., et al. Using a cardiac event recorder in children with potentially arrhythmia-related symptoms. *Ann Noninvasive Electrocardiol.* 2016; 21(5). doi: 10.1111/anec.12339.
32. Shahrier A., Hackett G.L., Cowen J.G., et al. Use of AliveCor Kardia Mobile in the detection of supraventricular tachycardia in a pediatric population. *Pediatrics.* 2021; 147(3). doi: 10.1542/peds.147.3MA1.24.
33. Attia Z.I., Noseworthy P., Lopez-Jimenez F., et al. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm. *Lancet.* 2019; 394: 861–867.
34. Leone D.M., O'Sullivan D., Bravo-Jaimes K. Artificial intelligence in pediatric electrocardiography. *Children (Basel).* 2024; 12(1). doi: 10.3390/children12010025.
35. Edenbrandt L., Rittner R. Recognition of lead reversals in pediatric electrocardiograms. *Am J Cardiol.* 1998; 82(10). doi: 10.1016/S0002-9149(98)00621-3.
36. 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). doi: 10.1111/aogs.14623.
37. Nishimori M., Kiuchi K., Nishimori K., et al. Accessory pathway analysis using a multimodal deep learning model. *Sci Rep.* 2021; 11(1). doi: 10.1038/s41598-021-87631-y.
38. Bos J.M., Zach I., Albert D.E., et al. Use of artificial intelligence and deep neural networks in evaluation of patients with electrocardiographically concealed long QT syndrome from the surface 12-lead electrocardiogram. *JAMA Cardiol.* 2021; 6(5): 532–538.
39. Nogimori Y., Sato K., Takamizawa K., et al. Prediction of adverse cardiovascular events in children using artificial intelligence-based electrocardiogram. *Int J Cardiol.* 2024; 406. doi: 10.1016/j.ijcard.2024.132019.
40. 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.

## Контактная информация:

Томчик Наталья Валентиновна – к. м. н., доцент,  
зав. кафедрой поликлинической педиатрии  
Гродненский государственный медицинский университет  
Ул. Горького, 80, 210009, г. Гродно  
Сл. тел. +375 15 255-91-37  
ORCID: 0000-0002-1334-7578

## Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Н. В. Т., Н. С. П.  
Сбор информации и обработка материала: Н. В. Т., Н. С. П.  
Написание текста: Н. В. Т., Н. С. П.  
Редактирование: Н. В. Т., Н. С. П.

Парамонова Нелла Сергеевна. ORCID: 0000-0003-4823-7819

Конфликт интересов отсутствует

Поступила 06.05.2026  
Принята к печати 16.06.2026