

# ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РИСК-СТРАТИФИКАЦИИ ПАРОКСИЗМОВ ФИБРИЛЛЯЦИИ ПРЕДСЕРДИЙ

DOI: 10.17691/stm2024.16.3.05

УДК 616.12–008.313.2–073.7

Поступила 20.10.2023 г.

© **А.В. Фролов**, д.б.н., профессор, зав. лабораторией медицинских информационных технологий;  
**О.П. Мельникова**, старший научный сотрудник лаборатории медицинских информационных технологий;  
**А.П. Воробьев**, старший научный сотрудник лаборатории медицинских информационных технологий;  
**Т.Г. Вайханская**, к.м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории медицинских информационных технологий

Республиканский научно-практический центр «Кардиология» Министерства здравоохранения  
Республики Беларусь, ул. Розы Люксембург, 110, Минск, 220036, Республика Беларусь

**Цель работы** — разработка и клиническое тестирование программно-аппаратного комплекса для выявления предикторов скрытых форм фибрилляции предсердий (ФП) по данным ЭКГ в 12 стандартных отведениях при синусовом ритме.

**Материалы и методы.** Разработан программно-аппаратный комплекс «Интекард 8.1», который оценивает комплекс маркеров электрической нестабильности предсердий по 3–5-минутным записям ЭКГ при синусовом ритме. Среди них — амплитуда Р-волны во II отведении  $<0,1$  мВ, длительность Р-волны  $>120$  мс, полная межпредсердная блокада, площадь терминальной части бифазной Р-волны  $<-4$  мВ·мс, индекс MVP (морфология–вольтаж–длительность)  $>3$  баллов.

Клиническое тестирование комплекса «Интекард 8.1» проведено в группе из 120 пациентов с диагнозами «ишемическая болезнь сердца» или «дилатационная кардиомиопатия». Средний возраст испытуемых —  $57,9 \pm 13,1$  года.

**Результаты.** Детекция Р-волны является сложной задачей, обусловленной низкой амплитудой сигнала, шумами, высокой вероятностью ошибок при атриовентрикулярной блокаде и суперпозиции Т- и Р-волн в случае выраженной тахикардии. Для улучшения детекции использован метод фазового преобразования сигнала, в соответствии с которым анализировалась его фазовая компонента  $\arctg[x(n)/Rv]$ , где  $x(n)$  — отсчеты ЭКГ-сигнала,  $Rv$  — константа. Разработан алгоритм идентификации, реализованный в программе «Интекард 8.1», и проведены клинические испытания программы.

В течение периода наблюдения 12 [6; 22] мес у 22 из 120 пациентов (18,3%) были зафиксированы эпизоды ФП. В группе пациентов с эпизодами ФП была значимо снижена амплитуда Р-волны ( $p=0,029$ ); увеличена ее длительность ( $p<0,001$ ); зафиксирован значимо высокий индекс MVP ( $p<0,01$ ). Наибольшей прогностической значимостью обладает индекс MVP с точкой отсечения  $>3$  баллов. Площадь под ROC-кривой AUC составила 0,988 при 95% ДИ: 0,975–0,999 ( $p<0,001$ ). Модель прогноза скрытых пароксизмов ФП обладает чувствительностью и специфичностью 92 и 89% соответственно.

**Заключение.** Цифровой электрокардиографический комплекс «Интекард 8.1» при анализе 3–5-минутных записей ЭКГ с синусовым ритмом способен выявлять пациентов с высоким риском или скрытой формой ФП. Динамическая оценка параметров Р-волны предоставляет возможность персонализировать контроль сердечного ритма в данной когорте пациентов.

**Ключевые слова:** фибрилляция предсердий; цифровая электрокардиография; синусовый ритм сердца; контроль сердечного ритма; «Интекард 8.1».

**Как цитировать:** Frolov A.V., Melnikova O.P., Vorobiev A.P., Vaikhanskaya T.G. Digital electrocardiographic complex for risk stratification of paroxysmal atrial fibrillation. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2024; 16(3): 43, <https://doi.org/10.17691/stm2024.16.3.05>

Для контактов: Фролов Александр Владимирович, e-mail: frolov.minsk@gmail.com

## Digital Electrocardiographic Complex for Risk Stratification of Paroxysmal Atrial Fibrillation

A.V. Frolov, DSc, Professor, Head of the Laboratory of Medical Information Technologies;  
O.P. Melnikova, Senior Researcher, Laboratory of Medical Information Technologies;  
A.P. Vorobiev, Senior Researcher, Laboratory of Medical Information Technologies;  
T.G. Vaikhanskaya, MD, PhD, Leading Researcher, Laboratory of Medical Information Technologies

Republican Scientific and Practical Centre "Cardiology", Ministry of Health of the Republic of Belarus,  
110 R. Luxembourg St., Minsk, 220036, Belarus

**The aim of the study** was to develop and clinically test a hardware and software system capable of identifying the predictors of the hidden forms of atrial fibrillation (AF) using 12-lead ECG data in sinus rhythm.

**Materials and Methods.** There was developed the hardware and software system "Intecard 8.1" to assess a set of markers for atrial electrical instability by 3–5-minute ECG recordings in sinus rhythm. The markers include P-wave amplitude in lead II  $<0.1$  mV, P-wave duration  $>120$  ms, advanced interatrial block, the area of the biphasic P-wave terminal part  $<-4$  mV·ms, and MVP (morphology–voltage–P-wave duration) score  $>3$  points.

The clinical testing of "Intecard 8.1" system was carried out on 120 patients with ischemic heart disease or dilated cardiomyopathy. The patients' average age was  $57.9 \pm 13.1$  years.

**Results.** P-wave detection is a challenging task due to a low signal amplitude, noise, high error probability in atrioventricular block or T-wave and P-wave superposition in case of marked tachycardia. To improve detection, a phase transformation method was used, according to which there was studied its phase component  $\arctg[x(n)/Rv]$ , where  $x(n)$  — ECG signal samples,  $Rv$  — a constant. We developed an identification algorithm implemented in "Intecard 8.1" software, its clinical trials being conducted.

During the 12 [6; 22] month observation period, AF episodes were recorded in 22 from 120 patients (18.3%). The patients with AF episodes exhibited a significant decrease in P-wave amplitude ( $p=0.029$ ), its duration increase ( $p<0.001$ ), and a significantly high MVP score ( $p<0.01$ ). The MVP score with a cut-off point  $>3$  points is of the highest prognostic significance. The area under the ROC curve AUC was 0.988 with a 95% confidence interval: 0.975–0.999 ( $p<0.001$ ). The prediction model of hidden AF paroxysms has sensitivity and specificity: 92 and 89%, respectively.

**Conclusion.** The digital electrocardiographic complex "Intecard 8.1" when analyzing 3–5-minute ECG recordings with sinus rhythm enables to identify the patients with high risk or with hidden AF forms. The dynamic assessment of P-wave parameters offers an opportunity to personalize heart rhythm control in this patient cohort.

**Key words:** atrial fibrillation; digital electrocardiography; sinus heart rhythm; heart rate control; "Intecard 8.1".

### Введение

Фибрилляция предсердий (ФП) представляет собой наиболее частую форму нарушений сердечного ритма. Распространенность в общей популяции населения достигает 1–2% с отчетливым трендом возрастания до 15% в старшей возрастной группе [1]. ФП является отягощающим фактором при артериальной гипертензии, ишемической болезни сердца, сердечной недостаточности, кардиомиопатии, дисфункции клапанного аппарата сердца и сахарном диабете, способствует прогрессированию этих заболеваний и усугубляет их осложнения. При ФП в 5 раз повышается риск инфаркта мозга [2].

Классическим диагностическим критерием ФП является отсутствие P-волн на поверхностной ЭКГ при нерегулярном ритме сердца. Однако скрытые (бессимптомные) формы ФП, доля которых превышает 20%, крайне сложно диагностировать. Это связано с тем, что при обычном ЭКГ-исследовании в медицинских учреждениях у большинства пациентов фик-

сируется нормальный синусовый ритм сердца [3]. Таким образом, в сферу внимания клинической медицины попадает лишь «видимая часть айсберга» проблемы ФП.

Существуют альтернативные методы выявления скрытой ФП. Первый из них — это длительный мониторинг с применением имплантируемых ЭКГ-регистраторов. Другим вариантом является выявление предикторов пароксизмов ФП по данным записей ЭКГ при синусовом ритме сердца. Второй метод представляется более доступным и экономически обоснованным [4].

Срыв синусового ритма при пароксизмах ФП происходит из-за дисфункции деполяризации предсердий, вследствие замедления их проводимости, наличия фиброзной ткани и роторов, т.е. гетерогенности [5]. Феномен гетерогенности, иными словами электрической нестабильности миокарда, успешно используется в клинической практике: от диагностики ишемии миокарда до стратификации риска внезапной сердечной смерти [6].

Прогностическая ценность ЭКГ-маркеров электрической нестабильности предсердий подтверждена в ряде работ [7–9]. Тем не менее их клиническому использованию препятствует сложность выделения параметров Р-волны на ординарном электрокардиографе вследствие малой мощности и зашумленности сигнала, а также большая трудоемкость ручной расшивки ЭКГ.

**Цель данного исследования** — разработка и клиническое тестирование программно-аппаратного комплекса, способного выявлять предикторы скрытых форм фибрилляции предсердий по данным ЭКГ в 12 стандартных отведениях при синусовом ритме.

## Материалы и методы

Разработан программно-аппаратный комплекс «Интекард 8.1», который путем прецизионной цифровой обработки оценивает комплекс маркеров электрической нестабильности предсердной фазы сердечного цикла по данным 3–5-минутных записей ЭКГ-сигнала в 12 стандартных отведениях при синусовом ритме.

Комплекс создан на платформе 12-канального цифрового ЭКГ-коммуникатора и PC-компьютера с лазерным принтером. Диапазон измерения сигналов составляет от 0,03 до 5,0 мВ, входной импеданс — >10 МОм, коэффициент ослабления синфазной помехи — 110 дБ, постоянная времени — >3,2 с, частота квантования — 1000 Гц/канал, разрядность — 24 бита, выходной интерфейс — USB 2.0. На этапе предварительной обработки ЭКГ использован комплект адаптивных цифровых фильтров сетевой (50 Гц), мышечной (35 Гц) и дыхательной помехи (<0,3 Гц) с коэффициентом искажения нативного сигнала <5% [10]. Для визуального врачебного контроля применена «электронная лупа» с усилением амплитуды Р-волны до 30–40 мм/мВ.

Оценивали комплекс ЭКГ-маркеров электрической нестабильности предсердий. Среди них низкая амплитуда —  $P_a < 0,1$  мВ во II отведении и увеличенная длительность Р-волны —  $P_d > 120$  мс [11]; полная межпредсердная блокада при  $P_d > 120$  мс и двухфазной форме Р-волны в отведениях II, III и aVF [12, 13]; площадь терминальной части двухфазной Р-волны  $< -4$  мВ·мс в отведении V1 [14]; индекс MVP (морфология–вольт–длительность) >2 баллов [15].

Для оценки прогностической эффективности комплекса «Интекард 8.1» проведены испытания на группе из 120 пациентов (средний возраст —  $57,9 \pm 13,1$  года) с артериальной гипертензией или дилатационной кардиомиопатией сердца; из них 66,7% мужчин; функциональный класс — I–III по NYHA; фракция выброса левого желудочка — 45 [40; 51]%. 37 пациентам (30,8%) были имплантированы двухкамерные частотно-адаптивные электрокардиостимуляторы (ЭКС) фирмы Medtronic (США). Срок наблюдения составил 12 [6; 22] мес. Во время указанного периода у пациентов

фиксируют эпизоды ФП при суточном мониторинге ЭКГ или интеррогировании ЭКС.

Исследование было проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации (2013) и одобрено этическим комитетом Республиканского научно-практического центра «Кардиология» (Республика Беларусь). Каждый пациент предоставил письменное информированное согласие.

**Статистический анализ.** Данные обрабатывали с помощью прикладных пакетов программ Statistica 10.0 (Stat Soft, США) и SPSS Statistics 23.0 (IBM, США). Результаты представляли в виде  $M \pm SD$  или  $Me$  [Q25; Q75] в зависимости от типа распределения. Проверку нормальности распределения выполняли с помощью критерия Шапиро–Уилка. При анализе различий между группами использовали t-критерий Стьюдента, критерий  $\chi^2$  Пирсона или U-критерий Манна–Уитни в зависимости от типа распределения. Критическое значение уровня статистической значимости при проверке нулевых гипотез принималось равным 0,05. При оценке диагностической ценности исследуемых параметров использовали ROC-анализ. Площадь под ROC-кривой (AUC) сопровождали расчетом 95% доверительного интервала (ДИ). Нулевой гипотезой в отношении AUC считали ее значение, равное 0,5.

## Результаты

Ключевым моментом в диагностике ФП является выявление факта наличия или отсутствия Р-волны, которая не всегда может быть замечена невооруженным глазом кардиолога, особенно при использовании аналоговых электрокардиографов. Детекция данной компоненты ЭКГ наиболее сложна вследствие малой мощности сигнала и высокой вероятности пропуска Р-волны при атриовентрикулярной блокаде или суперпозиции Т- и Р-волн при выраженной тахикардии.

Для идентификации маломощной Р-волны применили метод фазового преобразования (phasor transform, PT), с помощью которого слабый сигнал нелинейно усиливался. С этой целью дискретные отсчеты ЭКГ-сигнала  $x(n)$  были представлены в виде  $y(n) = Rv + jx(n)$ , где  $Rv$  — константа,  $j$  — мнимая единица. Далее анализировали фазовую компоненту сигнала, вычисляемую по формуле [16, 17]:

$$\varphi(n) = \arctg \left[ \frac{x(n)}{Rv} \right],$$

где  $\varphi(n)$  — фаза сигнала,  $\arctg$  — арктангенс.

Чем меньше значение константы  $Rv$ , тем больше коэффициент нелинейного усиления сигнала. График изменения модуля фазы  $|\varphi(n)|$  в зоне нахождения Р-волны представлен на рис. 1. Показаны нормальный и следующий за ним эктопический кардиобит (желудочковая экстрасистола). Нормальному желудочковому сокращению предшествует низковольтная Р-волна с заметно усиленным фазовым сигналом  $|\varphi(n)|$ . При

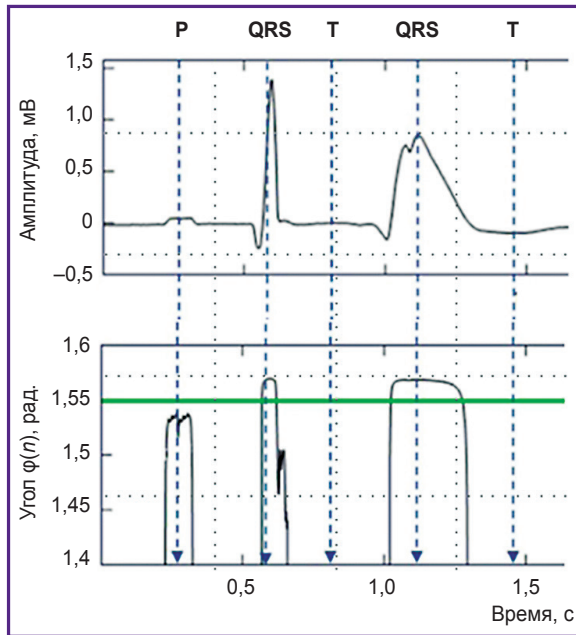


Рис. 1. Электрокардиограмма (сверху) и ее фазовое преобразование (снизу), представленное в виде модуля фазы  $|\varphi(n)|$

На графике изображены обычный кардиобит с отчетливой Р-волной и следующий за ним эктопический кардиобит (желудочковая экстрасистола) с отсутствием Р-волны (адаптирован из [14])

эктопическом желудочковом сокращении фазовый сигнал близок к нулю, следовательно, Р-волна в данном кардиобите отсутствует.

Разработан алгоритм детекции Р-волны на основе метода РТ; его блок-схема представлена на рис. 2. На первом этапе выполняется локализация QRS-комплексов, R-зубцов и RR-интервалов. Далее во временном окне, зависящем от текущих значений  $R(i)$  и  $RR(i)$ , с помощью метода РТ локализуется позиция текущей Т-волны. Затем выполняется проверка на принадлежность текущего QRS-комплекса к эктопическому желудочковому сокращению (PVC). Для этого сравниваются площадь текущего комплекса  $S_{QRS(i)}$  с медианным значением площади предыдущих комплексов  $S_{med, QRS(i-1)}$ . Площадь  $S_{QRS(i)}$  вычисляется в окрестности  $\pm 150$  мс от текущего зубца R(i). Если различие выше порогового значения, текущий комплекс QRS(i) признается эктопическим PVC и Р-волна в данном кардиобите не детектируется. В том случае, если доля эктопических комплексов превышает 75%, анализируемая запись ЭКГ бракуется.

Дальнейший поиск текущей Р-волны выполняется при отсутствии PVC-комплексов. При идентификации используется временное окно от  $R(i-1)+0,71RR(i)$  до  $R(i)-0,07RR(i)-60$  мс, в котором, применяя ранее упомянутое РТ, находим максимум фазы  $\varphi(n)$ , его принимаем за условную вершину Р-волны. Истинная вершина уточняется в окрестности  $\pm 20$  мс от условной по отсчетам ранее отфильтрованного ЭКГ-сигнала  $x(n)$ . В случае бифазной Р-волны вершину отрицательной фазы находим аналогичным способом.

Границы Р-волны идентифицируются в пределах временного окна, определенного выше. За начало ( $P_0$ ) принимаем первую из 20 точек от начала временного окна, амплитуда которой в 3 раза превышает уровень шума. Аналогично окончание ( $P_{end}$ ) — это первая из

20 точек, считая от окончания временного окна, амплитуда которой в 3 раза превышает уровень шума. За уровень шума принимаем цену младшего разряда аналого-цифрового преобразователя, в нашем случае — 0,15 мкВ.

На финишном этапе выполняются две дополнительные проверки: определяем, следует ли текущая Р(i)-волна после предыдущей Т(i-1)-волны и превышает ли амплитуда Р(i) порог, равный 0,05 R(i). Если да, то Р-волна считается детектированной; в противном случае — нет (см. рис. 2; на рисунке не представлены случаи детектирования Р-волны при атриовентрикулярной блокаде II степени, так как в данной ситуации QRS-комплекс отсутствует, а также при суперпозиции Т- и Р-волн в случае выраженной тахикардии).

Клиническая апробация комплекса «Интекард 8.1» проведена в группе из 120 пациентов. В качестве первичной конечной точки (события) принимали бессимптомные эпизоды ФП, зарегистрированные при интеррогировании ЭКС или при суточном мониторинге ЭКГ. Всем пациентам проводили анамнестический скрининг, выполняли физикальное обследование, регистрировали 3–5-минутную запись ЭКГ в 12 стандартных отведениях с оценкой параметров Р-волны, используя разработанную компьютерную программу «Интекард 8.1». Выполняли также суточное мониторирование ЭКГ (Oxford Medilog; Oxford, Великобритания), эхокардиографическое исследование (Vivid 7; General Electric, США) и биохимический анализ крови. Корректность компьютерной оценки параметров Р-волны контролировал высококвалифицированный кардиолог-функционалист.

В течение периода динамического наблюдения (12 [6; 22] мес) у 22 из 120 пациентов (18,3%) были зафиксированы эпизоды ФП. При этом частота детекции



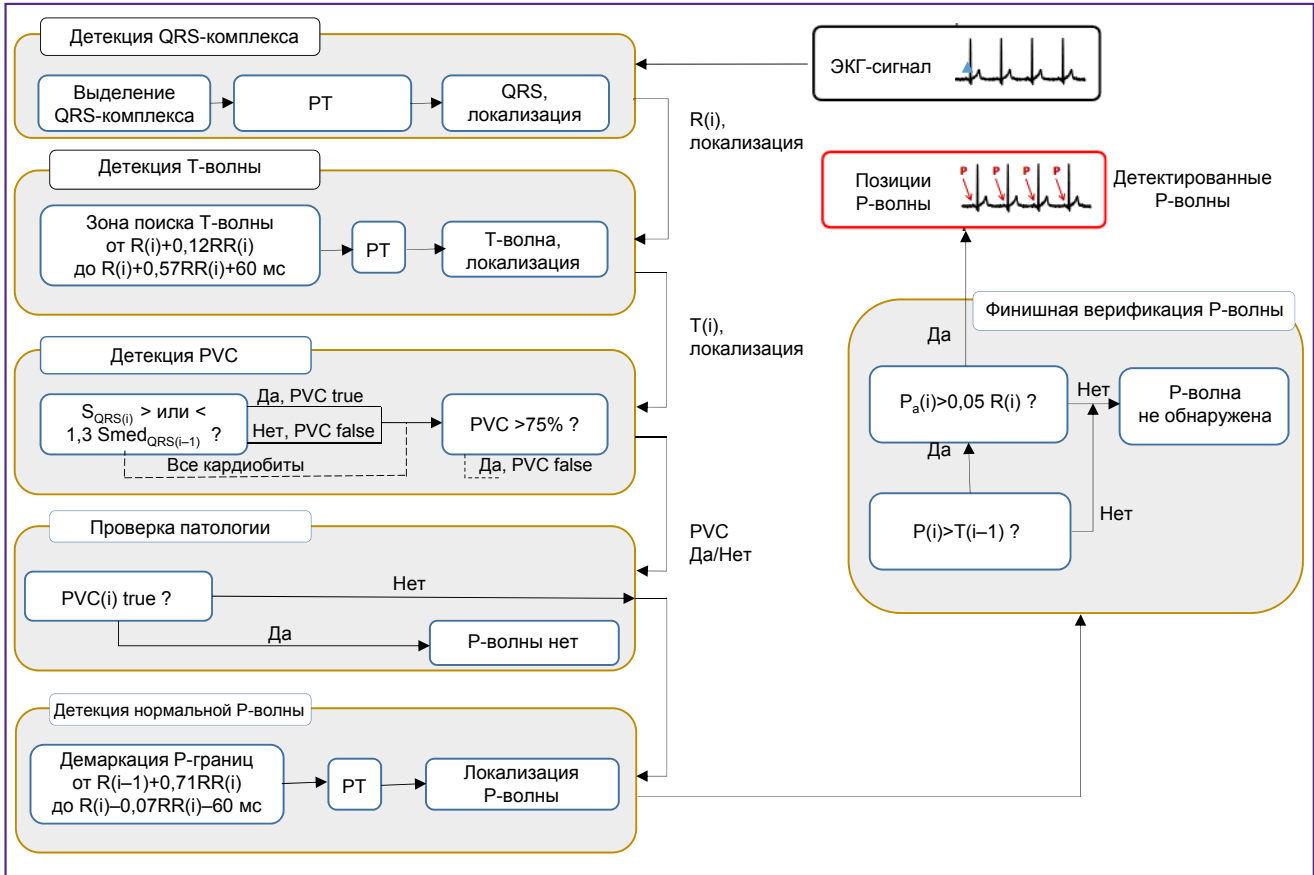


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обнаружения Р-волны на основе фазового преобразования true — истинный, false — ложный. Остальные обозначения см. в тексте

Таблица 1

Характеристики пациентов без и с зарегистрированными эпизодами фибрилляции предсердий, M±SD

Параметры	Группа без эпизодов ФП (n=98)	Группа с эпизодами ФП (n=22)	p
Возраст, лет	57,4±14,8	59,9±10,7	0,658
Индекс массы тела	29,6±5,6	29,8±7,0	0,734
Фракция выброса, %	53,1±9,7	43,3±9,7	0,045
Размер левого предсердия, мм	45,2±5,6	44,9±5,9	0,631
Шкала CHA <sub>2</sub> DS <sub>2</sub> -VASc, баллы	1,6±1,2	1,6±1,2	0,989
Интервал PR, мс	182±40	185±46	0,813
Амплитуда Р-волны, мВ	0,16±0,02	0,09±0,03	0,029
Длительность Р-волны, мс	112±12	146±16	<0,001
Индекс MVP, баллы	2,0±1,0	3,8±1,1	<0,01
Полная межпредсердная блокада, %	53,1±9,7	43,3±9,7	0,045
Площадь терминальной части бифазной Р-волны, мВ·мс	-3,3±3,9	-4,5±4,2	0,439

ФП у пациентов с имплантированными ЭКС и без них составила 35,1 и 10,8% соответственно. Основные характеристики обследованных пациентов приведены в табл. 1.

При сопоставлении этих групп не было выявле-

но статистически значимых различий по возрасту, шкале риска CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc, размеру левого предсердия и интервалам PR. При этом у пациентов с эпизодами ФП была значимо снижена амплитуда Р-волны: 0,09±0,03 против 0,16±0,02 мВ (p=0,029);

Таблица 2

**Результаты оценки площадей AUC для ЭКГ-предикторов фибрилляции предсердий**

Параметры	Точка отсечения	AUC	95% ДИ	p
Индекс MVP, баллы	3	0,988	0,975–0,999	<0,001
Длительность P-волны, мс	130	0,878	0,777–0,979	<0,01
Шкала CHA <sub>2</sub> DS <sub>2</sub> -VASc, баллы	3	0,512	0,372–0,652	0,989

увеличена ее длительность: 146±16 против 112±12 мс (p<0,001); зафиксирован значимо высокий индекс MVP: 3,8±1,1 против 2,0±1,0 балла (p<0,01). Частота полной межпредсердной блокады оказалась несколько выше у пациентов без событий ФП: 53,1±9,7 против 43,3±9,7% (p=0,045). Статистически значимые различия при оценке площади терминальной части бифазной P-волны не выявлены: -3,3±3,9 против -4,5±4,2 мВ·мс (p=0,439).

В табл. 2 представлены результаты оценки площадей AUC для ЭКГ-предикторов ФП и шкалы риска инсульта CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc.

Наибольшей прогностической значимостью обладает индекс MVP (морфология–вольтаж–длительность) с точкой отсечения >3 баллов; площадь под ROC-кривой AUC составила 0,988 при 95% ДИ: 0,975–0,999 (p<0,001). Значимым предиктором оказалась также длительность P-волны >130 мс; AUC=0,878 при 95% ДИ: 0,777–0,979 (p<0,01). Шкала риска CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc >3 баллов не проявила прогностических качеств. Площадь AUC составила всего 0,512 при 95% ДИ: 0,372–0,652 (p=0,989). Так как индекс MVP является интегрированным параметром, включающим в том числе и длительность P-волны, то в прогностическую модель включили только данный параметр, чувствительностью и специфичностью которого составили 92 и 89% соответственно.

Таким образом, шкала MVP, интегрирующая в себе патологическую морфологию, амплитуду и длительность P-волны, определена в качестве основного независимого предиктора развития пароксизмальной ФП в исследуемой группе пациентов с ишемической болезнью сердца и дилатационной кардиомиопатией.

**Обсуждение**

Клинические испытания программно-аппаратного комплекса «Интекард 8.1» продемонстрировали возможность извлечения из ЭКГ ценной прогностической информации о вероятности наличия у пациента пароксизмов ФП при отсутствии ее диагностических признаков во время текущего ЭКГ-обследования. В нашей работе установлено, что 3–5-минутные записи ЭКГ при синусовом ритме, содержащие маркеры электрической нестабильности предсердий, позволяют идентифицировать пациентов с высоким риском или с ранее «незамеченными» пароксизмами

ФП. Широко используемые в настоящее время шкалы риска APPLE, BASE-AF, CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc, LOGO и другие обладают низкой прогностической точностью, так как основаны только на популяционных факторах, таких как возраст, пол, ИБС, артериальная гипертензия, сахарный диабет 2-го типа в анамнезе. У упомянутых методов оценки риска площадь под ROC-кривой AUC находится в пределах от 0,55 до 0,67 [18]. По причине неудовлетворительной точности шкал риска ФП клиницисты часто сталкиваются с трудностями при выборе оптимального лечения для каждого конкретного пациента [19]. Полученные нами результаты согласуются с ранее зафиксированными фактами.

Установлено, что использование информации об электрической нестабильности предсердий повышает точность индивидуального прогноза. Например, в исследовании F. Kreimer с соавт. [20] продемонстрирована предиктивная способность низковольтной P-волны, полной межпредсердной блокады, терминальной части бифазной P-волны и индекса MVP. У пациентов с отсутствием указанных предикторов риск ФП составил всего 4%, с одним предиктором — 18%, с двумя — 41%, а с четырьмя — 70% (p<0,01) [20]. Наши результаты выявили доминирующую прогностическую роль индекса MVP, сочетающего изменение морфологии, снижение вольтажа и расширение P-волны. Длительность P-волны более 130 мс отражает замедление проводимости вследствие замещения миокарда фиброзной тканью, а индекс MVP>3 баллов свидетельствует о ремоделировании левого предсердия [9].

При решении задачи обнаружения скрытой сердечно-сосудистой патологии перспективно применение искусственного интеллекта (ИИ). Так, ИИ на 25% улучшил точность прогноза ФП в сравнении со шкалой риска инсульта CHA<sub>2</sub>DS<sub>2</sub>-VASc. Однако для успешного использования ИИ необходимо интегрировать значительные объемы ЭКГ-данных, что реально достижимо только в рамках многоцентровых исследований. Например, в исследовании Z.I. Attia с соавт. для создания ИИ-модели прогнозирования ФП авторы проанализировали более 650 000 ЭКГ с ФП [21].

Следует подчеркнуть, что разработанное нами программное средство «Интекард 8.1» значительно облегчает процесс измерения параметров слабозаметных P-волн на поверхностной ЭКГ. Тем не менее в

настоящей версии нашей программы еще не использован полный набор прецизионных параметров систолы предсердий. В ближайших планах — включить в анализ пространственную и временную дисперсию, патологическое отклонение электрической оси, а также меру хаоса P-волны по 3–5-минутным записям ЭКГ.

К ограничениям метода следует отнести сравнительно небольшую группу обследованных пациентов и вероятность пропуска очень редких пароксизмов ФП.

## Заключение

Цифровой электрокардиографический комплекс «Интекард 8.1» по данным анализа 3–5-минутных записей ЭКГ с синусовым ритмом позволяет идентифицировать пациентов с высоким риском фибрилляции предсердий. Динамическая оценка параметров P-волны предоставляет возможность персонализировать контроль сердечного ритма в данной когорте пациентов.

Неинвазивность, высокая пропускная способность и относительно низкая стоимость цифровой электрокардиографической аппаратуры обеспечивают доступность созданной технологии для всех уровней здравоохранения, включая первичное звено.

**Финансирование исследования.** Работа выполнена в рамках НИОКР №462 в Республиканском научно-практическом центре «Кардиология» (Республика Беларусь).

**Конфликты интересов,** связанные с данной статьей отсутствуют.

## Литература/References

- Rahman F., Kwan G.F., Benjamin E.J. Global epidemiology of atrial fibrillation. *Nat Rev Cardiol* 2014; 11(11): 639–654, <https://doi.org/10.1038/nrcardio.2014.118>.
- Wolf P.A., Dawber T.R., Thomas H.E. Jr., Kannel W.B. Epidemiologic assessment of chronic atrial fibrillation and risk of stroke: the Framingham study. *Neurology* 1978; 28(10): 973–977, <https://doi.org/10.1212/wnl.28.10.973>.
- Camm A.J., Corbucci G., Padeletti L. Usefulness of continuous electrocardiographic monitoring for atrial fibrillation. *Am J Cardiol* 2012; 110(2): 270–276, <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2012.03.021>.
- Kirchhof P., Benussi S., Kotecha D., Ahlsson A., Atar D., Casadei B., Castella M., Diener H.C., Heidbuchel H., Hendriks J., Hindricks G., Manolis A.S., Oldgren J., Popescu B.A., Schotten U., Van Putte B., Vardas P.; ESC Scientific Document Group. 2016 ESC Guidelines for the management of atrial fibrillation developed in collaboration with EACTS. *Eur Heart J* 2016; 37(38): 2893–2962, <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehw210>.
- Antzelevitch C., Dumaine R. Electrical heterogeneity in the heart: physiological, pharmacological and clinical implications. In: *Comprehensive physiology. Supplement 6. Handbook of physiology, the cardiovascular system, the heart*. American Physiological Society; 2011; p. 654–692, <https://doi.org/10.1002/cphy.cp020117>.
- Verrier R.L., Nearing B.D., D'Avila A. Spectrum of clinical applications of interlead ECG heterogeneity assessment: from myocardial ischemia detection to sudden cardiac death risk stratification. *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2021; 26(6): e12894, <https://doi.org/10.1111/anec.12894>.
- Alexander B., Mildner J., Hazim B., Haseeb S., Bayes-Genis A., Elosua R., Martínez-Sellés M., Yeung C., Hopman W., Bayes de Luna A., Baranchuk A. New electrocardiographic score for the prediction of atrial fibrillation: the MVP ECG risk score (morphology-voltage-P-wave duration). *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2019; 24(6): e12669, <https://doi.org/10.1111/anec.12669>.
- Murase Y., Imai H., Ogawa Y., Kano N., Mamiya K., Ikeda T., Okabe K., Arai K., Yamazoe S., Torii J., Kawaguchi K. Usefulness of P-wave duration in patients with sick sinus syndrome as a predictor of atrial fibrillation. *J Arrhythm* 2021; 37(5): 1220–1226, <https://doi.org/10.1002/joa3.12604>.
- Intzes S., Zagoridis K., Symeonidou M., Spanoudakis E., Arya A., Dinov B., Dagres N., Hindricks G., Bollmann A., Kanoupakis E., Koutalas E., Nedijs S. P-wave duration and atrial fibrillation recurrence after catheter ablation: a systematic review and meta-analysis. *Europace* 2023; 25(2): 450–459, <https://doi.org/10.1093/europace/euac210>.
- Vorobiev A.P., Vaykhanskaya T.G., Melnikova O.P., Krupenin V.P., Polyakov V.B., Frolov A.V. A digital electrocardiographic system for assessing myocardial electrical instability: principles and applications. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2020; 12(6): 15, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.6.02>.
- Nielsen J.B., Kühl J.T., Pietersen A., Graff C., Lind B., Struijk J.J., Olesen M.S., Sinner M.F., Bachmann T.N., Haunsø S., Nordestgaard B.G., Ellinor P.T., Svendsen J.H., Kofoed K.F., Køber L., Holst A.G. P-wave duration and the risk of atrial fibrillation: results from the Copenhagen ECG Study. *Heart Rhythm* 2015; 12(9): 1887–1895, <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2015.04.026>.
- Bayés-de-Luna A., Fiol-Sala M., Martínez-Sellés M., Baranchuk A. Current ECG aspects of interatrial block. *Hearts* 2021; 2(3): 419–432, <https://doi.org/10.3390/hearts2030033>.
- Vaikhanskaya T.G., Frolov A.V. The new clinical Bayes syndrome: definitions, epidemiology and clinical significance. *Cardiology in Belarus* 2022; 14(6): 803–813, <https://doi.org/10.34883/pi.2022.14.6.009>.
- Huang Z., Zheng Z., Wu B., Tang L., Xie X., Dong R., Luo Y., Li S., Zhu J., Liu J. Predictive value of P wave terminal force in lead V1 for atrial fibrillation: a meta-analysis. *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2020; 25(4): e12739, <https://doi.org/10.1111/anec.12739>.
- Yang N., Yan N., Cong G., Yang Z., Wang M., Jia S. Usefulness of morphology-voltage-P-wave duration (MVP) score as a predictor of atrial fibrillation recurrence after pulmonary vein isolation. *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2020; 25(6): e12773, <https://doi.org/10.1111/anec.12773>.
- Martínez A., Alcaraz R., Rieta J.J. Application of the phasor transform for automatic delineation of single-lead ECG fiducial points. *Physiol Meas* 2010; 31(11): 1467–1485, <https://doi.org/10.1088/0967-3334/31/11/005>.
- Saclova L., Nemcova A., Smisek R., Smital L., Vitek M., Ronzhina M. Reliable P wave detection in pathological ECG signals. *Sci Rep* 2022; 12(1): 6589, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10656-4>.

18. Mulder M.J., Kemme M.J.B., Hopman L.H.G.A., Kuşgözoğlu E., Gülçiçek H., van de Ven P.M., Hauer H.A., Tahapary G.J.M., Götte M.J.W., van Rossum A.C., Allaart C.P. Comparison of the predictive value of ten risk scores for outcomes of atrial fibrillation patients undergoing radiofrequency pulmonary vein isolation. *Int J Cardiol* 2021; 344: 103–110, <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2021.09.029>.
19. Sikorska A., Pilichowska-Paszkiel E., Zuk A., Piotrowski R., Kryński T., Baran J., Zaborska B., Kułakowski P. Acceleration of sinus rhythm following ablation for atrial fibrillation: a simple parameter predicting ablation efficacy. *Kardiol Pol* 2019; 77(10): 960–965, <https://doi.org/10.33963/KP.14950>.
20. Kreimer F., Aweimer A., Pflaumbaum A., Mügge A., Gotzmann M. Impact of P-wave indices in prediction of atrial fibrillation-Insight from loop recorder analysis. *Ann Noninvasive Electrocardiol* 2021; 26(5): e12854, <https://doi.org/10.1111/anec.12854>.
21. Attia Z.I., Noseworthy P.A., Lopez-Jimenez F., Asirvatham S.J., Deshmukh A.J., Gersh B.J., Carter R.E., Yao X., Rabinstein A.A., Erickson B.J., Kapa S., Friedman P.A. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm: a retrospective analysis of outcome prediction. *Lancet* 2019; 394(10201): 861–867, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)31721-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31721-0).