

ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

ОСЛОПОВ ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, ORCID ID: 0000-000302901-0694, Scopus Author ID: 6602523658 докт. мед. наук, профессор кафедры пропедевтики внутренних болезней имени профессора С.С. Зимницкого ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Россия, 420012, г. Казань, ул. Бутлерова, 49, e-mail: voslopov1845@gmail.com

КУЩЕВА АЛИНА ВАДИМОВНА, ORCID ID: 0000-0003-4957-1763, студентка, ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Россия, 420012, г. Казань, ул. Бутлерова, 49, e-mail: alinka18_03@mail.ru

ХАЙРУЛЛИН АМИР РАИСОВИЧ, ORCID ID: 0000-0001-9299-7167, студент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Россия, 420012, г. Казань, ул. Бутлерова, 49, e-mail: Globalshot@mail.ru

КАДЫРОВА ЗУЛЬФИНАЗ МАРСОВНА, ORCID ID 0000-0003-1266-363X, студентка, ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Россия, 420012, г. Казань, ул. Бутлерова, 49, e-mail: zmarsova@yandex.ru

ОСЛОПОВА ЮЛИЯ ВЛАДИМИРОВНА, ORCID ID: 0000-0002-9752-8703, канд. мед. наук, доцент, доцент кафедры внутренних болезней, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, e-mail: oslopovajul@mail.ru

ХАЗОВА ЕЛЕНА ВЛАДИМИРОВНА, ORCID ID: 0000-0001-8050-2892; Scopus Author ID: 57205153574, Resercher ID O-2336-2016, RSCI Author ID 639552, канд. мед. наук, доцент, доцент кафедры пропедевтики внутренних болезней им. профессора С.С. Зимницкого ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, 420012, Россия, Казань, ул. Бутлерова, 49, научный сотрудник УНИЛ «Новые профессиональные компетенции по здоровьесбережению» института фундаментальной медицины и биологии ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, e-mail: hazova_elena@mail.ru

ГРИШИНА ЯНА ДМИТРИЕВНА, ORCID ID: 0009-0006-5651-933X, студентка, ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, 420012, Россия, г. Казань, ул. Бутлерова, 49, e-mail: plasmodium@bk.ru

КИМ ЗУЛЬФИЯ ФАРИТОВНА, ORCID ID: 0000-0003-4240-3329, канд. мед. наук, доцент кафедры внутренних болезней ФГБОУ ВО «Казанский государственный медицинский университет» Минздрава России, Россия; заместитель главного врача по медицинской части ГАУЗ «Городская клиническая больница №7 им.М.Н.Садыкова» г. Казани, Россия; главный внештатный кардиолог МЗ РТ, e-mail: profz@yandex.ru

Реферат. Введение. Прогресс современных технологий и достижения в сфере электроники и медицинского оборудования позволяют достичь большой высоты в обнаружении различных аритмий, при этом имеется возможность наблюдать за данными состояниями непосредственно во время их появления. Тем не менее существует проблема, заключающаяся в прогнозировании жизнеугрожающих состояний, при которых может возникнуть остановка сердца, вследствие чего наступает внезапная сердечная смерть, также необходимо отметить некоторые трудности в своевременном прогнозировании инфаркта миокарда, поэтому необходимо разрабатывать или внедрять уже имеющиеся технологии, позволяющие обеспечить высокую чувствительность и специфичность в отношении данных нарушений. **Цель.** Изучить возможности метода электрокардиографии высокого разрешения для выявления дополнительных критериев ишемии миокарда и информирования о возможности возникновения нарушения ритма сердца. **Материал и методы.** Методологические подходы. Проведен поиск и анализ источников в базах данных NCBI, E-library, Google Scholar по ключевым словам: «Advanced ECG», «High Frequency ECG» «HF ECG ischaemia». Годы поиска – 1930-2022. Публикации, содержащие только резюме, тезисы, а также дублирующие информацию были исключены из анализа. Таким образом, в настоящий описательный обзор вошли обобщенные и систематизированные данные 50 источников: актуальных клинических исследований, отчетов и систематических обзоров. **Результаты и их обсуждение.** Метод электрокардиографии высокого разрешения является наиболее перспективным методом относительно тех качеств, которыми должен обладать необходимый метод для регистрации подобных нарушений. Метод электрокардиографии высокого разрешения при формировании кардиограммы включает в себя три этапа: 1) регистрация высокочастотных электрических сердечных потенциалов; 2) усиление сигнала посредством вычислительных мощностей компьютера для увеличения разрешающей способности; 3) усреднение сигнала путем математических вычислений, дальнейшая фильтрация необходимых участков электрокардиограммы. Совокупность представленных этапов позволяет зарегистрировать низкоамплитудные сигналы, в случае использования стандартного метода электрокардиографии регистрация данных фрагментов была бы невозможна. Низкоамплитудные сигналы являются важной диагностической информацией при стратификации рисков жизнеугрожающих сердечно-сосудистых заболеваний. Выявление потенциалов замедленной деполяризации миокарда, поздних потенциалов желудочков и поздних потенциалов предсердий является важной задачей при определении представленных патологий. **Выводы.** На протяжении тридцати лет было проведено большое число испытаний метода высокочастотной электрокардиографии в различных странах, таких как США, Израиль, Испания, Италия, Южная Корея, Япония, Россия, Австрия, Великобритания. В ходе этих исследований было доказано преимущество данного метода над стандартным методом регистрации электрических потенциалов сердца. В статье представлены информация об исследованиях и изложены факты, доказывающие эффективность работы метода электрокардиографии высокого разрешения. **Ключевые слова:** электрокардиографии высокого разрешения, высокочастотная электрокардиография, высокочастотные комплексы QRS, RAZ-зоны (зоны сниженной амплитуды), ишемия миокарда, поздние потенциалы желудочков, поздние потенциалы предсердий, обзор литературы.

Для ссылки: Ослопов В.Н., Кущева А.В., Хайруллин А.Р., и др. Электрокардиография высокого разрешения в клинической практике // Вестник современной клинической медицины. – 2023. – Т.16, вып.6. – С. 110-122. DOI: 10.20969/VSKM.2023.16(6).110-122.

HIGH-RESOLUTION ELECTROCARDIOGRAPHY IN CLINICAL PRACTICE

OSLOPOV VLADIMIR N., ORCID ID: 0000-000302901-0694, Scopus Author ID: 6602523658; Dr. sc. med., Professor at the Department of Internal Medicine named after Prof. S. S. Zimnitsky, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: voslopov1845@gmail.com

KUSHCHEVA ALINA V. ORCID ID: 0000-0003-4957-1763, Student, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: alinka18_03@mail.ru

KHAIRULLIN AMIR R., ORCID ID: 0000-0001-9299-716; Student, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: Globalshot@mail.ru

KADYROVA ZULFINAZ M., ORCID ID: 0000-0003-1266-363X; Student, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: zmarsovna@yandex.ru

OSLOPOVA JULIA V., ORCID ID: 0000-0002-9752-8703, Cand. sc. med., Associate Professor at the Department of Internal Diseases, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya str., 420008 Kazan, Russia; e-mail: oslopovajul@mail.ru

KHAZOVA ELENA V., ORCID ID: 0000-0001-8050-2892; Scopus Author ID: 57205153574, Researcher ID O-2336-2016, RSCI Author ID 639552; Cand. sc. med., Associate Professor at the Department of Internal Medicine named after Prof. S. S. Zimnitsky, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; Scientific Officer at the Academic and Research Laboratory – Emerging Vocational Competencies in Health Protection of the Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan Federal University, 18 Kremlevskaya Str., 420008 Kazan, Russia; e-mail: hazova_elena@mail.ru (correspondence author)

GRISHINA YANA D., ORCID ID: 0009-0006-5651-933X; Student, Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: plasmodium@bk.ru

KIM ZULFIYA F., ORCID ID: 0000-0003-4240-3329; Cand. sc. med., Deputy Chief Physician for Treatment of City Clinical Hospital 7, Kazan, Russia; Chief Visiting Cardiologist of the Ministry of Health of the Republic of Tatarstan; Associate Professor at the Department of Internal Medicine # 2 of Kazan State Medical University, 49 Butlerov str., 420012 Kazan, Russia; e-mail: profz@yandex.ru

Abstract. Introduction. Current technological progress and advances in electronics and medical equipment allow reaching unprecedented heights in the detection of various arrhythmic conditions, while such conditions can be observed directly at the time of their occurrence. Nevertheless, there is an issue related to predicting life-threatening conditions that may lead to cardiac arrest causing sudden cardiac death. We should also note some difficulties in timely predicting myocardial infarction. Therefore, it is necessary to develop new or implement the existing technologies that allow ensuring high susceptibility and specificity toward these disorders. **Aim.** To study the potential of high-frequency electrocardiography regarding identifying additional criteria for myocardial ischemia and informing about the possible development of cardiac arrhythmia. **Materials and Methods.** Methodological approaches: We searched for and analyzed sources in the NCBI and eLibrary databases and in Google Scholar using the following keywords: Advanced ECG, High Frequency ECG, and HF ECG ischaemia. The search was filtered for the years 1930-2022. Publications containing only summaries, abstracts, or duplicated information were excluded from the analysis. Thus, this present descriptive review includes generalized and systematized data from 50 sources, encompassing current clinical trials, reports, and systematic reviews. **Results and Discussion.** High-frequency electrocardiography is the most promising method in terms of the qualities required for a technique to register such disorders. When forming a cardiogram, the high-frequency electrocardiography method has three stages: 1) Registration of high-frequency electrical cardiac potentials; 2) signal amplification due to the computational performance to enhance the resolution; and 3) signal averaging through mathematical computations and further filtering the necessary sectors of the electrocardiogram. Combining the stages presented above allows registering low-amplitude signals, which would be impossible when using standard electrocardiography techniques. Low-amplitude signals provide important diagnostic information in risk stratification regarding life-threatening cardiovascular diseases. Detecting delayed myocardium depolarization potentials, ventricular late potentials, and atrial late potentials is an important task in identifying these pathologic conditions. **Conclusions.** Over thirty years, the high-frequency electrocardiography technique has been frequently studied and tested in various countries, such as the USA, Israel, Spain, Italy, South Korea, Japan, Russia, Austria, and Great Britain. These studies have proven the advantage of this method over the standard method of recording the electrical potentials of heart. This paper presents information on the studies and the facts proving the efficacy of the high-resolution electrocardiography technique.

Keywords: high-resolution ECG, high-frequency ECG, signal-averaged electrocardiography, high-frequency QRS complexes, RAZ zones, cardiac ischemia, ventricular late potentials, atrial late potentials, literature review.

For reference: Oslopov VN, Kushcheva AV, Khairullin AR, et al. High-resolution electrocardiography in clinical practice. The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine. 2023;16(6):110-122. DOI: 10.20969/VSKM.2023.16(6).110-122.

Введение. Заболевания сердечно-сосудистой системы на протяжении многих лет являются одной из ведущих причин заболеваемости и смертности населения. Наличие в распоряжении врача современного диагностического оборудования позволяет повысить качество работы. Некоторые

жизнеугрожающие состояния ускользают от используемых в настоящее время аппаратов электрокардиографии (ЭКГ) в связи со слабыми характеристиками электрокардиографа и отсутствием необходимого программного обеспечения. Метод высокочастотной ЭКГ позволяет регистрировать высокочастотные

(ВЧ) сигналы низкой амплитуды, которые не удастся увидеть на стандартной ЭКГ.

Цель. Изучить метод электрокардиографии высокого разрешения.

Материалы и методы. Проведен поиск и анализ источников в базах данных NCBI и E-library, Google Scholar по ключевым словам: «Advanced ECG», «High Frequency ECG» «HF ECG ischaemia». Годы поиска – 1930-2022. Публикации, содержащие только резюме, тезисы, а также дублирующие информацию были исключены из анализа. Таким образом, в настоящий описательный обзор вошли обобщенные и систематизированные данные 50 источников: актуальных клинических исследований, отчетов и систематических обзоров.

Результаты и обсуждение.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭКГ.

Впервые способом регистрации сердечных потенциалов заинтересовался британский ученый-физиолог А.Д. Уоллер в 1887 году. Спустя череду экспериментов, он пришел к выводу, что для наиболее репрезентативных результатов необходимо накладывать электроды на конечности, а не на тело. Для записи результатов использовалась фотопленка и электрометр Липпмана. А.Д. Уоллер выступал со своим аппаратом на конференциях и на одной из конференций, проведенной в Лондоне в 1889 году В. Эйнтховен заинтересовался аппаратом Уоллера и обратил внимание на несовершенство метода записи результатов. В дальнейшем В. Эйнтховен решил провести работы по усовершенствованию метода записи ЭКГ и выбор пал на струнный гальванометр Агера, который использовался в те годы для приема трансатлантических телеграмм. Но добиться результата удалось лишь к 1903 году, гальванометр позволял получить более точную электрокардиограмму, поскольку нить записывающего устройства была гораздо чувствительнее, чем колебания столбца ртути электрометра Липпмана. В те же годы ученый дал названия зубцам и сформировал векторную теорию происхождения потенциалов на ЭКГ [1].

В 1889 г. Виллем Эйнтховен, побывав на конференции ученого А.Д. Уоллера, который демонстрировал электрокардиограммы сердца человека, полученные с помощью электрометра, заинтересовался изучением данного метода диагностики, предугадав его перспективность в науке. В. Эйнтховен понимал, что электрокардиограмма была чрезвычайно несовершенной, что объяснялось низкой чувствительностью электрометра и высокой инерцией ртути, и предпринял математическое усовершенствование расчетов [2]. В 1903 г. В. Эйнтховен записал стандартную ЭКГ. Он предложил подобную схему регистрации сердечных потенциалов: электроды на теле человека необходимо расположить таким образом, чтобы их проекция сформировала равносторонний треугольник, центр треугольника при этом должен совпадать с точкой интегрального электрического вектора сердца, при этом замерять необходимо разность между двумя его вершинами. Вершины представляют собой правое и левое предплечья, левую ногу, на которые должны быть наложены электроды, при этом две отдельно взятые точки (правое пред-

плечье-левое предплечье, правое предплечье-левая нога, левое предплечье-левая нога) будут называться стандартными отведениями (рис. 1).

Значительный вклад в развитие ЭКГ внес Франк Вильсон, предложивший в 1932 г. 9 однополюсных отведений (рис. 2,3) [3, 4].

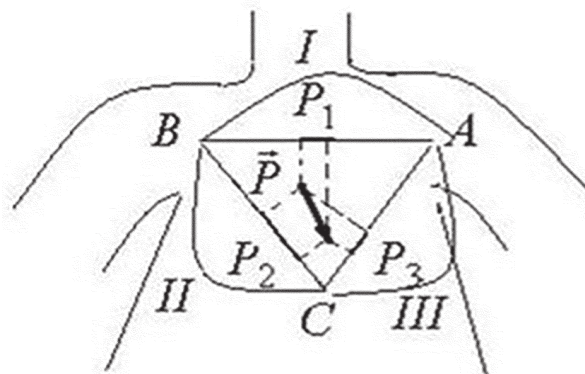


Рис. 1. Треугольник Эйнтховена
Fig. 1. Einthoven's triangle

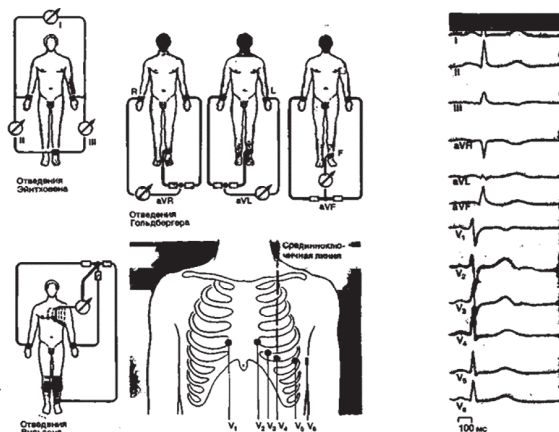


Рис. 2. 9 отведений по Франку Вильсону
Fig. 2. 9-leads by Frank Wilson

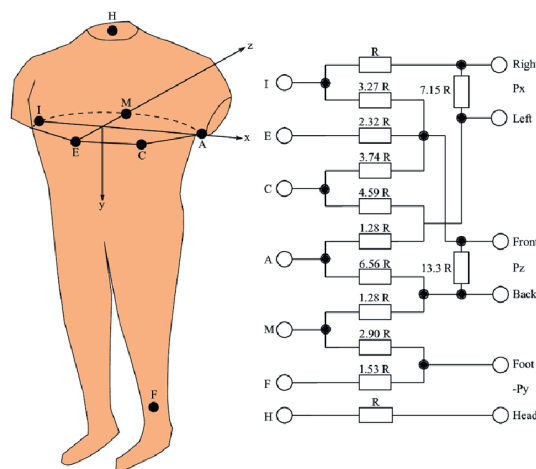


Рис. 3. Ортогональные отведения по Франку
Fig. 3. Orthogonal leads by Franc

Для улучшения диагностических методов приходится совершенствовать традиционные алгоритмы и прибегать к использованию специальных вычислительных процедур, позволяющих извлекать из сигнала информацию, которую невозможно получить при визуальном анализе записи. Однако при снятии биоэлектрических сигналов возникает комплекс помех и искажений: эффект поляризации электродов, приводящий к смещению нулевого уровня сигнала; артефакты смещения электродов, создающие выбросы случайной амплитуды и длительности; электрофизиологические помехи. Например, в практике оперативного анализа ЭКГ проблема обнаружения QRS-комплекса возникает в случае малой интенсивности формы ЭКГ, при этом наличие значительных помех может быть обусловлено сильными мышечными сокращениями или зашумленности телеметрического канала. В этом случае наиболее эффективно задача решается при использовании априорной информации о неизменной форме ЭКГ и оптимальных методов выделения сигнала известной формы из помех [5].

Стандартная электрокардиограмма является тестом первой линии при постановке диагноза «ишемия миокарда», однако существует ограничение данного метода по причине его невысокой чувствительности и при этом обладающего высокой специфичностью. Существует метод мониторингирования состояния пациента посредством регистрации ЭКГ, но лишь у небольшого процента исследуемых пациентов удается выявить ишемию. По этой причине возникает потребность в разработке альтернативных методов, способных обеспечить необходимый уровень качества. Известно, что высокочастотная ЭКГ (ВЧ ЭКГ) способна регистрировать признаки ишемизированных зон миокарда (RAZ-зоны) и вероятные нарушения ритма, проявляющиеся в качестве потенциалов замедленной деполяризации миокарда (поздние потенциалы желудочков (ППЖ) и предсердий (ППП)).

В последние десятилетия было опубликовано множество исследований, посвященных методу электрокардиографии высокого разрешения (ЭКГ ВР), в ходе данных статей была доказана эффективность данного метода, а также его преимущество перед методом стандартной ЭКГ [6]. Сердечные потенциалы имеют широкий спектр частот, однако стандартный метод ЭКГ способен регистрировать лишь в узком спектре частот – от 0,05 до 100 Гц, таким образом, более высокие частоты «ускользают» от стандартного электрокардиографа, однако регистрация более высоких частот (150-250 Гц) становится возможной с использованием высокочастотного электрокардиографа, стоит отметить что данный спектр частот находится преимущественно в комплексе QRS, анализ которого способен предоставить информацию для дальнейшей диагностики нарушения (рис. 4,5) [7, 8, 9]. ЭКГ-сигналы исследовали в различных диапазонах частот с фильтрами разных типов и различными методиками усреднения для подавления шумов, однако нет стандартного (общепринятого) метода для выделения и количественного описания ЭКГ ВР [10, 11].

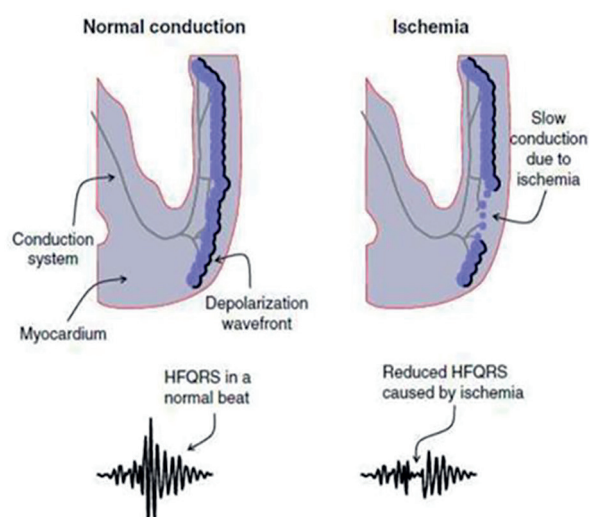


Рис. 4. Физиология ВЧ QRS комплексов
Fig. 4. Physiology of RF QRS complexes

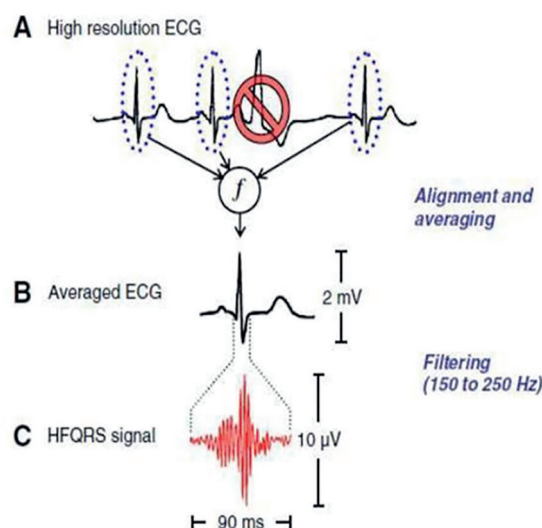


Рис. 5. Получение ВЧ QRS.
Fig. 5. Receiving RF QRS.

На рисунке показаны боковая и верхушечная части левого желудочка, включая миокард и проводящую систему. В фазе деполяризации сигналы электрических волн распространяются через проводящую систему волокон Пуркинье и активируют многие области миокарда одновременно, в результате чего эти волны деполяризации фрагментируются на микроскопический уровень. Эта фрагментация создает низкоамплитудные и высокочастотные уровни сигнала. Компоненты ВЧ QRS (внизу слева). Ишемия снижает как частоту, так и амплитуду фазы 0 потенциала действия, что снижает миоцитарную проводимость, фрагментацию волны деполяризации и меняет высокочастотные составляющие на более низкие частоты. Следовательно, ишемия снижает амплитуду ВЧ QRS.

ВЧ QRS получают из 12 отведений ЭКГ с высоким разрешением, в которых программное обеспечение обнаруживает комплексы QRS (отбрасывая арте-

факты) и фильтрует их в полосе частот от 150 до 250 Гц, на которой были получены данные [12, 13].

ЭКГ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

ЭКГ ВР – это такой тип ЭКГ, который использует больше отведений и проводит более точные измерения с улучшенной обработкой сигнала, чтобы обеспечить детальное представление об электрической активности сердца. ЭКГ ВР может регистрировать изменения, которые может пропустить стандартная ЭКГ в 12 отведениях, такие как незначительные отклонения сегмента ST или аномалии в зубце T. ЭКГ ВР может использоваться для обследования пациентов с подозрением на сердечные заболевания, такие как ишемическая болезнь сердца (ИБС), аритмия или сердечная недостаточность, и может предоставить более точную диагностическую информацию, чем обычная ЭКГ. Если стандартная ЭКГ измеряется с чувствительностью до десятков мкВ и имеет верхнюю частоту полосы пропускания 100 Гц, то ЭКГ ВР обладает чувствительностью до нескольких мкВ и верхней частотой полосы пропускания до 1000 Гц. Дальнейшее повышение чувствительности, до долей мкВ, открывает перспективу для ЭКГ сверхвысокого разрешения [14, 15].

В последние годы в клинической практике для стратификации пациентов с высоким риском внезапной смерти (ВС) все более широкое применение находят неинвазивные методы диагностики электрической нестабильности сердца (ЭНС), такие, как ЭКГ высокого разрешения. Прогностическая значимость этих методов в отношении риска желудочковых аритмий (ЖА) и ВС исследована при различной сердечно-сосудистой патологии. Однако состояние ЭНС при артериальной гипертензии (АГ) у пациентов с сахарным диабетом (СД) остается недостаточно изученным.

С целью изучения прогностической значимости показателей ЭКГ ВР в отношении желудочковых экстрасистол высоких грааций (ЖЭ ВГ) проведено их сравнение в группах с и без патологии. При АГ у пациентов с СД с ЖЭ ВГ значения продолжительности фильтрованного комплекса QRS (QRSf) ($125,9 \pm 5,5$ мс), длительности конечного интервала фильтрованного комплекса QRS с амплитудой менее 40 мкВ ($50,44 \pm 5,8$ мс) достоверно выше, а среднеквадратичная амплитуда последних 40 мс комплекса QRS ($11,2 \pm 2,4$ мкВ) ниже таковых в сравнении с пациентами без ЖЭ ВГ. По данным E.G. Vester и соавт. (1992), ППЖ при АГ тесно связаны с выявлением спонтанной и индуцированной желудочковой тахикардии (ЖТ). Так, при проведении ЭКГ ВР у 61 больного АГ, ППЖ выявлены у 10 %, а ЖТ – у 21%. При этом частота регистрации ЖТ во время программированной электрокардиостимуляции составила 30 %.

С помощью метода ЭКГ ВР стало возможным выявление низкоамплитудной фрагментированной электрической активности в конце комплекса QRS – поздних потенциалов желудочков, являющихся маркером патологоанатомического субстрата re-entry [16].

Метод ЭКГ ВР в диагностике ишемии миокарда. В 1986 г. впервые были обнаружены провалы амплитуды QRS-комплекса – зоны сниженной амплитуды (reduced amplitude zone – RAZ). Данный

феномен зарегистрировала и описала группа доктора S. Abboud при изучении метода ЭКГ ВР. Также они установили чувствительность RAZ (75%) к ИБС. Данное открытие привлекло внимание других авторов, вследствие чего началось более подробное изучение высокочастотной ЭКГ. Таким образом, были введены несколько дополнений к данному методу: регистрация и анализ 12-ти общепринятых отведений, оценка критериев RMS и Kurtosis, параметр RAZ классифицировали на Abboud RAZ (RAZ A), Abboud Percent RAZ (RAZ AP), NASA RAZ (RAZ N) [17, 18].

Показатели Abboud RAZ (RAZ A), Abboud Percent RAZ (RAZ AP), NASA RAZ (RAZ N) – морфологический варианты RAZ, у которых амплитуда второго локального максимума огибающей высокочастотных компонентов QRS-комплекса или второго локального минимума не больше 30% (RAZ A), больше или равна 30% (RAZ AP) от амплитуды первого локального максимума и больше или равна 30% от амплитуды первого локального максимума и первого локального минимума (RAZ N).

Каждой категории RAZ программа присваивался определенный балл: RAZ A – 1 балл, RAZ AP – 2 балла, RAZ N – 3 балла (рис. 6).

Электрокардиограмма 57-летнего мужчины с поражением двух коронарных сосудов и перенесенным нижним инфарктом миокарда (рис. 7 В). На ней наблюдаются более выраженные зоны с уменьшенной амплитудой, RAZ N во всех отведениях кроме I (в нем RAZ AP) и V1 [19].

Исследования ученых из Северной Америки.

В марте 2004 г. в американской газете Mayo Clinic Proceedings была опубликована статья «Real-Time 12-Lead High-Frequency QRS Electrocardiography for Enhanced Detection of Myocardial Ischemia and Coronary Artery Disease», частично поддержанная грантом NASA, президентской премией за раннюю карьеру и фондами дискреционного и технологического развития директора Космического центра Джонсона. В своей работе ученые из Северной Америки рассказывают о разработанном ими новом программном обеспечении: «...программное обеспечение NASA автоматическим ищет в реальном времени локальные максимумы и минимумы огибающей QRS частоты сердечных сокращений не только в соответствии с оригинальными критериями Abboud, но и отдельно в соответствии с более строгими критериями, которые были разработаны для повышения полезности обнаружения RAZ для клинической диагностики...».

ВЧ ЭКГ QRS в реальном времени показывает значительные перспективы не только для улучшения выявления ишемии миокарда, но и в тщательно отобранных группах населения для недорогого скрининга на выявление ишемической болезни сердца и других сердечных заболеваний с использованием подходящего оборудования для ЭКГ покоя в 12 отведениях и сопутствующего программного обеспечения [20].

¹ Также, в статье указан электронный адрес, на который врачи, заинтересованные в оценке программного обеспечения для ЭКГ ВЧ QRS, могут запросить образовательную версию (воспроизведение) по электронной почте todd.t.schlegel@nasa.gov

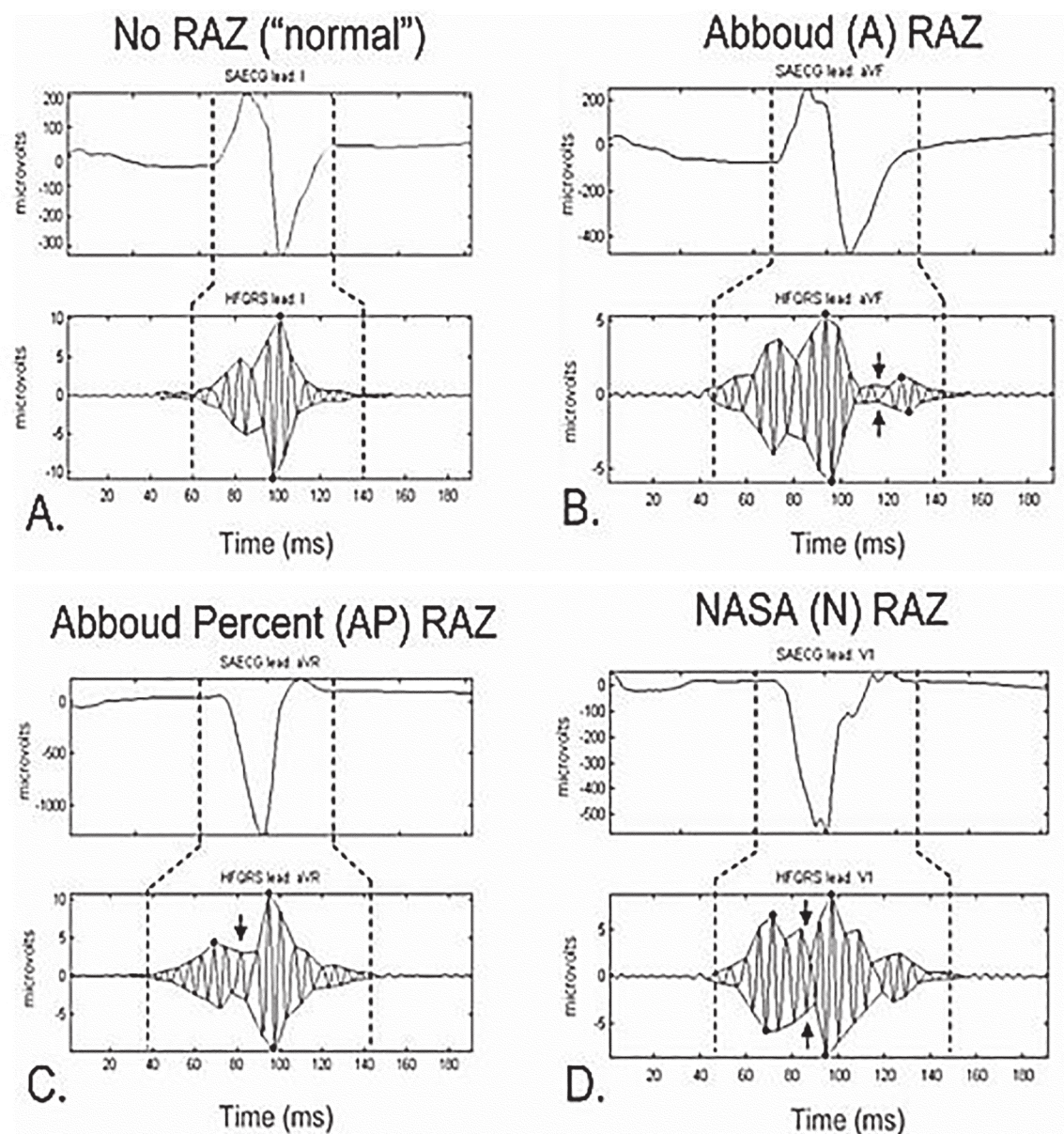


Рис. 6. Верхний график – ЭКГ стандартного разрешения, нижний – высокочастотная ЭКГ
Fig. 6. The upper graph is a standard-resolution ECG, the lower one is a high-frequency ECG

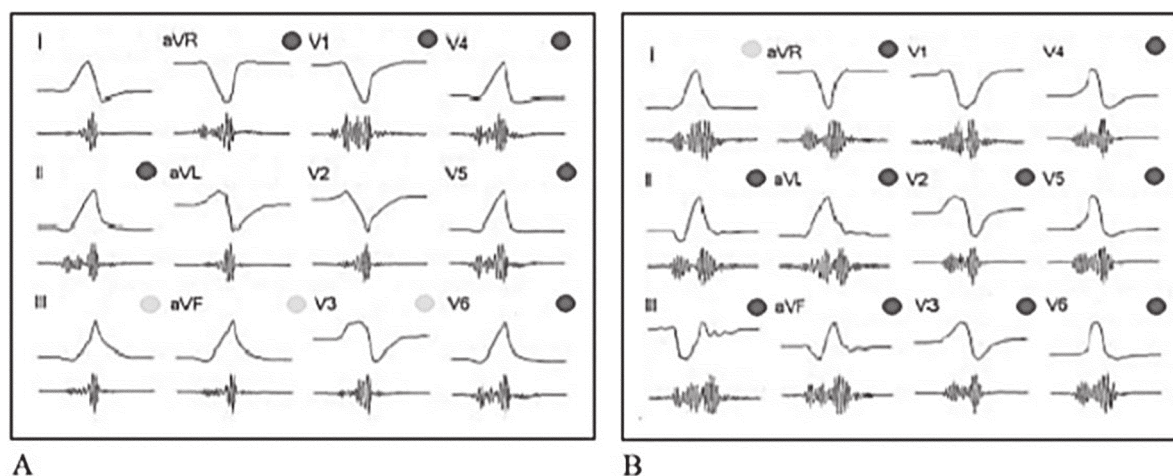


Рис. 7. Электрокардиограмма 57-летнего мужчины с поражением двух коронарных сосудов и перенесенным нижним инфарктом миокарда
Fig. 7. Electrocardiogram of a 57-year-old man with a lesion of two coronary vessels

Исследования учёных из Израиля. На основании многих исследований было показано, что изменения в амплитуде и морфологии ВЧ QRS являются чувствительными диагностическими маркерами ишемии миокарда, часто превосходящими показатели изменений сегмента ST. В марте 2014 г. в открытом доступе была опубликована статья «Quantifying QRS changes during myocardial ischemia: Insights from high frequency electrocardiography» ученых из Израиля, которые проводили исследования для оценки технологии Hyper QTM. Подводя итоги своей работы, они указали, что индекс морфологии ВЧ QRS выше у пациентов с острым коронарным синдромом, с хорошей чувствительностью у пациентов без повышения ST. Таким образом, в 6 исследованиях, в которых оценивалась технология Hyper QTM, средняя чувствительность и специфичность анализа ВЧ QRS составили $75\% \pm 6\%$ и $80\% \pm 6\%$, соответственно, по сравнению со средней чувствительностью $48\% \pm 16\%$ и средней специфичностью $70\% \pm 15\%$ анализа сегмента ST. Таким образом, эти результаты исследований могут быть переведены в коммерчески доступные системы ЭКГ и используются в клинической практике для улучшения диагностики и мониторинга ишемии миокарда [21].

Исследования ученых из Испании. В 2015 г. в университете Сарагосы на кафедре физиологии была опубликована статья-обзор успехов, достигнутых в раннем выявлении ИБС «Revisión bibliográfica: detección precoz de la cardiopatía isquémica». Из перечисленных новых методов авторы выделяют, что наиболее важным достижением является применение технологии ВЧ QRS, которая с чувствительностью $75\% \pm 6\%$ и специфичностью $80\% \pm 6\%$ превосходит предыдущие диагностические тесты.

Авторы отмечают, что у пациентов, у которых анализ сегмента ST не был значимым, метод ВЧ QRS позволяет диагностировать вероятность развития ишемии. Также было описано, что количество пораженных отведений ВЧ QRS коррелирует с количеством окклюзированных коронарных сосудов и, следовательно, с объемом ишемизированного участка ткани. По измененным отведениям ВЧ QRS диагноз можно ориентировать на тот или иной пораженный сосуд, представляя более выраженное снижение ВЧ QRS в прекардиальных отведениях только в группе с окклюзией левой передней нисходящей коронарной артерии, тогда как снижение ВЧ QRS в отведения от конечностей наблюдались в группах передней левой нисходящей, левой огибающей и правой коронарной артерии. Исходя из этих данных ВЧ QRS стал технически жизнеспособной технологией с убедительными доказательствами, подтверждающими его клиническое использование. Анализ ВЧ QRS имеет широкий спектр клинических применений в качестве теста с физической нагрузкой, дифференцировки боли в груди или мониторинга с помощью имплантируемых устройств и может потенциально улучшить диагностику и мониторинг ишемии миокарда при одновременном снижении затрат на здравоохранение [12].

Исследования ученых из Италии. В ноябре 2015 г. в американском журнале The American Journal

of Emergency Medicine была опубликована статья итальянских докторов «High-frequency QRS analysis superior to conventional ST-segment analysis of women with chest pain». Они исследовали эффективность нового анализа ВЧ компонентов QRS, который был предложен у пациентов с болью в груди, направленных на тест на толерантность к физическим упражнениям (ex-ECG). Сравнивая работу ЭКГ стандартного разрешения с ЭКГ ВР, они выяснили, что у пациентов с болями в груди анализ ex-ВЧ/QRS играет ценную инкрементную прогностическую роль по сравнению с стандартной ЭКГ, особенно у женщин [22].

Исследования ученых из США. В ноябре 2018 г. в американском журнале Journal of Nuclear Cardiology была опубликована статья «High-frequency QRS analysis to supplement ST evaluation in exercise stress electrocardiography: Incremental diagnostic accuracy and net reclassification». В данной статье американские ученые поделились методикой и результатами своих исследований, в которых они сравнили точность диагностики и чистую реклассификацию анализа ВЧ QRS по сравнению с оценкой ST для существенной ишемии миокарда с помощью перфузионной визуализации миокарда SPECT.

Перфузионная визуализация миокарда – это форма функциональной визуализации сердца, используемая для диагностики ишемической болезни сердца. Основной принцип заключается в том, что в условиях стресса больной миокард получает меньше кровотока, чем нормальный миокард. В этом перспективном анализе ЭКГ с помощью анализа ВЧ QRS выявила любую существенную ишемию с высокой точностью диагностики [23].

Исследования ученых из России. В 2020 г. в Южно-Российском журнале терапевтической практики была опубликована статья Колосовой К. С. «Высокочастотная электрокардиография как дополнительный метод диагностики ишемии миокарда у пациентов с ИБС различного возраста». В ходе исследования было выявлено, что ВЧ ЭКГ в 12-ти общепринятых отведениях может давать дополнительную информацию и в связи с чем может быть использована как метод неинвазивной диагностики ишемии миокарда.

Также, исходя из результатов исследования, параметры RAZ и Kurtosis имеют корреляционные взаимосвязи с количеством гемодинамически значимых стенозов. Подобные результаты могут говорить о взаимосвязи высокочастотных показателей QRS – комплекса и степени атеросклеротического поражения коронарного русла.

Отдельно было отмечено, что лица пожилого и старческого возраста имеют значимо более высокие значения параметров суммы RAZ и Kurtosis, что соответствует большему количеству гемодинамически значимых стенозов по данным селективной коронарографии в этой возрастной группе [24,25].

Метод ЭКГ ВР для выявления риска развития нарушений сердечного ритма с помощью исследования поздних потенциалов сердца. На ЭКГ стандартного разрешения поздние потенциалы практически не выявляются, в связи с невозможностью регистрации данных сигналов и дифференциации

поздних потенциалов от шумовых компонентов ввиду их крайне низких амплитуд. Для получения качественного результата применяется фильтрация электромагнитных помех, усиление полезного сигнала в 20–50 тыс. раз, обработка и анализ 100–400 комплексов QRS. ЭКГ BP с применением двунаправленных четырехполюсных фильтров в диапазонах 25–250 и 40–250 Гц позволяют определять ППЖ и ППЖ [26,27].

Метод ЭКГ BP в диагностике поздних потенциалов изучался во многих странах, учёные со всего мира проводили экспериментальные пробы на разных возрастных группах и по физической активности.

Исследования ученых из США. Впервые феномен поздних потенциалов был зарегистрирован в клинических и экспериментальных исследованиях с помощью сигнал-усредненной ЭКГ (СУ-ЭКГ). M. B. Simson усреднил биполярные проводы X, Y, Z и обработал двунаправленным цифровым фильтром, что позволило обнаруживать низкоамплитудные сигналы в терминальном комплексе QRS и сегменте ST [28].

В 1987 г. E. Berbari, L. Fontain et al. обнаружили замедленную желудочковую электрическую активность, предшествующую появлению желудочковых тахикардий. С целью регистрации этих сигналов на поверхности тела используется метод их усреднения для улучшения отношения сигнал/шум. Эти так называемые «поздние потенциалы» были в центре внимания нескольких исследований на животных и все большего числа клинических исследований [29].

Электрофизиологический субстрат ППЖ называют «аритмогенным», так как он является основой для запуска желудочковых тахикардий по механизму re-entry, представляя собой зоны миокарда с низкоамплитудной, фрагментированной, замедленной активностью и задержкой желудочковой деполяризации.

В 1992 г. ученые из США занимались изучением оценки эффективности реваскуляризации миокарда, обнаружения нарушений ритма сердца у пациентов с предшествующим инфарктом миокарда (ИМ) на ЭКГ BP. В ходе исследования были проанализированы данные ЭКГ BP, которые были сняты до, во время и после спровоцированной острой ИМ путем баллонной ангиопластики коронарных артерий у обследуемых пациентов. Таким образом, ученые отметили значительное снижение среднеквадратичного суммарного вольтажа последних 40 мс фильтрованного QRS-комплекса (RMS40) и удлинение низкоамплитудного сигнала в конце комплекса (LAS40) без значимого увеличения общей длительности фильтрованного комплекса QRS (fQRS). Также было замечено, что у пациентов, у которых в анамнезе имелся инфаркт миокарда, в исследовании чаще регистрировались ППЖ [30].

В ходе своего исследования ученые из штата Небраска в 1994 г. выяснили, что ВЧ ЭКГ является полезным, неинвазивным методом идентификации пациентов после инфаркта миокарда, подверженных риску аритмических событий, особенно в сочетании с существующими инструментами, такими как 24-часовой амбулаторный мониторинг, эхокардиография,

нуклеотидная ангиография и коронарная ангиография. Метод имеет ограниченное положительное прогностическое значение, при этом отличное отрицательное прогностическое значение [31].

В 1995 г. была опубликована статья американских учёных B. J. Rubal, J. R. Bulgrin, J. K. Gilman. «Time-frequency analysis of ECG for late potentials in sudden cardiac death survivors and post-myocardial infarction patients», в которой говорилось о том, что поздние потенциалы являются предвестниками внезапной сердечной смерти (ВСС) для определенных групп пациентов, включая выживших после ВСС и пациентов после инфаркта миокарда. В этом ретроспективном исследовании изучалась чувствительность и специфичность частотно-временных распределений при обнаружении поздних потенциалов у 90 пациентов с использованием критериев усреднения сигнала во временной области ЭКГ в качестве стандарта для сравнения. В ходе своего исследования они выясняли, что чувствительность использованного способа определения ППЖ с помощью СУ-ЭКГ позволяет достичь 92–100%, а специфичность достигает 78–92% [32].

Исследования ученых из Испании. В 1990 году исследованиями ППЖ у пациентов, перенесших ИМ, активно занимались одновременно с другими исследователями ученые из Испании, J. L. Palma Gamiz и соавторы. Исследуемую группу (n=50) поделили на две подгруппы: А – пациенты (средний возраст 54,2 г.) с острым периодом ИМ) и В – пациенты (средний возраст 58,1 г.) с недавно перенесшим ИМ (3 месяца). В контрольной подгруппе С находились 20 здоровых добровольцев. Для оценки результатов исследования применялись стандартные параметры. ППЖ были зарегистрированы у 32% пациентов в подгруппе А и в 56% случаев в подгруппе В ($p < 0,001$), при этом в контрольной группе отсутствовали. Однако максимальная регистрация желудочковых аритмий на третьей неделе ЭКГ мониторингирования по Holter не показала значимой корреляции с наличием ППЖ в подгруппе А [33].

Исследования из Австрии. В 1992 г. была опубликована статья «Ventricular late potentials in hemodialysis patients and the risk of sudden death» исследователей из Австрии, в которой говорилось, что сердечно-сосудистые заболевания являются причиной половины смертей у пациентов, находящихся на хроническом гемодиализе. При исследовании 54 пациентов, находящихся на диализе, было показано, что ППЖ, то есть низкоамплитудные потенциалы в терминальной части комплекса QRS, в значительной степени указывают на жизнеугрожающие аритмии и внезапную смерть [34].

Исследования ученых из Японии. В марте 1993 г. ученые из Японии провели исследование для выяснения связи между временем, необходимым для реперфузии, и частотой возникновения поздних потенциалов. Они пришли к выводу, что быстрое восстановление нормального коронарного кровотока у пациентов после ангиопластики также ассоциировалось с гораздо более редкой регистрацией ППЖ. Выявление ППЖ у пациентов, перенесших ангиопластику и стентирование коронарных артерий

через < 4, 4–6, 6–8, 8–10 и более 10 часов от начала инфаркта миокарда, составило 8, 12, 14, 33 и 43% соответственно. В противоположность этому при консервативной тактике лечения пациентов с ИМ ППЖ выявлялись в 48% случаев [35].

Исследования ученых из Великобритании. В 1993 г. ученые из Великобритании Zaman A.G., Morris J.L., Smyllie J.H., Cowan J.C. провели перспективное исследование для оценки связи между расширением желудочков и развитием поздних потенциалов после инфаркта миокарда. Пациенты со стойкими положительными поздними потенциалами ($n=9$) на всех трех записях в первую неделю показали заметное увеличение индекса конечно-диастолического объема – на $21,3 \pm 8,1$ мл/м² ($p < 0,005$ по сравнению с пациентами, у которых были стойкие отрицательные поздние потенциалы [$n=20$]). Был сделан вывод, что стойкие положительные поздние потенциалы желудочков связаны с последующей дилатацией желудочков и это может быть важным прогностическим параметром [36].

Исследования ученых из России. В 1993 г. А. С. Галевич совместно с Г. М. Камаловым, опубликовали обзорную статью, в которой были собраны исследования о трудности и в то же время важности регистрации ППЖ, так как была доказана связь между ППЖ и ЖТ. Чередование участков здорового миокарда с ишемизированными зонами запускают механизм re-entry, который в свою очередь продуцирует ЖТ. Таким образом, зарегистрировав ППЖ на ЭКГ, можно своевременно предупредить возникновение ЖТ. Однако ППЖ невозможно заметить на ЭКГ, требуется использование метода СУ-ЭКГ [37].

В 1997 г. В.С. Морозкин, Г.В. Гусаров с соавторами, как и многие зарубежные исследователи, взяли за основу методику M.B. Simson, которая заключается в использовании универсальных усилителей EMT-12 (фирмы «Siemens-Elema»), а также три системы отведений: униполярная (V1 и V5 грудные отведения), биполярная (отведения X, Y и Z) и ортогональная по Франку. Им удалось записать ЭКГ в полосе частот от 0,05 до 700 Гц с усилением в 5–50 раз больше стандартного, обработав и дифференцировав сигналы 400 комплексов P-QRS-T с последующей фильтрацией, ученые отметили: ППЖ чаще выявляются в униполярных и биполярных отведениях, чем в системе ортогональных отведений по M. B. Simson. Также они указали на необходимость тщательного экранирования кабелей и использования предусилителей только с дифференциальным входом и высоким соотношением сигнал/шум, так как амплитуда регистрируемого сигнала значительно меньше, чем электрические шумы от внешних источников [38,39].

В 2001 году была опубликована статья Р. Жалюнаса, Ю. Браджжените, И. Блужайте и соавт. «Поздние потенциалы желудочков в остром и заживающем периодах инфаркта миокарда». Ученые отразили изменения динамики ППЖ, затрагивающие электрофизиологические свойства кардиомиоцитов при ИМ. Мозаичное чередование жизнеспособных кардиомиоцитов с участками ишемии, фиброза и некроза объясняется появлением в пораженных

зонах на пути импульса большого сопротивления, что в свою очередь объясняет появление следовой активности желудочков. В случае восстановления утраченных функций ишемизированного миокарда, а также ограничения зон некроза на фоне лечения, возможно исчезновение ППЖ. Р. Жалюнас и соавт. в своем исследовании обнаружили ППЖ у 40,5% пациентов с острым ИМ в первые сутки, у 28,5% – на третьи сутки и у 45,2% – на четырнадцатые сутки от начала заболевания, причем на 3 и 14 сутки достоверно чаще при остром ИМ с зубцом Q (39,1% и 7,7%, 55,1% и 23,1% соответственно) [40].

В 2007 г. в рекомендациях «Диагностика и лечение больных острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST на ЭКГ» отмечено преимущество спектрального анализа СУ-ЭКГ: нивелирование негативного влияния фонового шума и шума фильтра, возможность включить в исследование пациентов с блокадами ножек пучка Гиса [41].

С 2015 года по рекомендациям Европейского общества кардиологов СУ-ЭКГ является частью необходимого минимума обследований родственников пациентов с синдромом внезапной необъяснимой смерти или внезапной аритмогенной смерти. Были определены показатели, необходимые для анализа основных количественных критериев ПЖ:

1. Продолжительность фильтрованного комплекса QRS (totQRS):

2. Длительность низкоамплитудных (менее 40 мкВ) сигналов терминального комплекса QRS:

3. Среднеквадратичная амплитуда последних 40 мс фильтрованного комплекса QRS.

В случае регистрации у пациента двух или более критериев, в совокупности с стандартными методами можно диагностировать наличие ППЖ [42].

В 2018 г. вышла обзорная статья М. М-Б. Богатыревой, в которой указаны преимущества и диагностические возможности метода СУ-ЭКГ в клинической практике. В этой статье был раскрыт механизм micro re-entry, как основа электрофизиологического феномена ППЖ. Было проведено детальное исследование в участках с локальной задержкой проведения возбуждения различной этиологии: зона ИМ, воспалительные, инфицированные, склерозированные участки миокарда, местные нарушения электролитного баланса, активация симпатических влияний и другие воздействия, приводящие к локальному замедлению проведения импульса и появлению очагов спонтанной электрической активности [43].

Исследования из Румынии. Спустя несколько десятилетий с начала изучения выявления поздних потенциалов ученые из Румынии A. Incze, S. Cotel, E. Carasca в 2012 г. опубликовали статью, в которой они указали на диагностическую значимость ППЖ в определении риска внезапной смерти. Ученые проводили свое исследование в течение 5 лет ($n=60$, средний возраст больше 51 г.), у 50 % ППЖ не были зарегистрированы. В результате были сделаны следующие заключения: в группе пациентов с ППЖ внезапную смерть перенесли шесть пациентов, а эпизоды желудочковых тахикардий были зафиксированы у двух пациентов, при этом не были зафиксированы случаи внезапной смерти у пациентов без ППЖ [44].

Исследования ученых из Республики Корея.

Исследователи из Кореи решили оценить связь между энергичными упражнениями и развитием аномального позднего потенциала в структурно измененном сердце профессиональных спортсменов и по методу СУ-ЭКГ, для сравнения они также взяли группу людей, которые не занимались спортом. Поздние потенциалы желудочков были значительно чаще у спортсменов (15,5% против 35,4%, $p=0,012$). Что касается эхокардиографических параметров, у спортсменов был больший размер камеры сердца [45].

В процессе развития методов регистрации сердечных потенциалов ученые и исследователи прибегали к улучшению не только физических параметров электрокардиографов, но и электродов, фильтров и непосредственно способов регистрации. Данные шаги были направлены на улучшение диагностических способностей ЭКГ в клинической практике. Еще одним значимым методом является сверхвысокочастотная ЭКГ (СВЧ ЭКГ).

СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЭКГ

СВЧ ЭКГ – это метод регистрации сердечных потенциалов, который работает в диапазоне 500-1000 Гц, в то время как ВЧ ЭКГ обычно измеряет сигналы ЭКГ в диапазоне 150-500 Гц. Это означает, что СВЧ ЭКГ измеряет более высокочастотные составляющие сигнала ЭКГ, нежели ВЧ ЭКГ [46,47].

Основным преимуществом СВЧ ЭКГ является то, что она может обнаруживать очень тонкие изменения в форме сигнала ЭКГ и эффективна при обнаружении ишемических изменений в сердце. СВЧ ЭКГ показала себя многообещающей в выявлении ранних изменений в сердце, которые могут указывать на ишемическую болезнь сердца, и прогнозировании риска развития сердечных заболеваний.

Команда чешского учёного P. Jurak в 2013 г. проводили исследование «Ultra-high-frequency ECG Measurement». В ходе своей работы, они изучали, может ли СВЧ-QRS диагностировать ишемию сердца, не обнаруживаемую при низкочастотном QRS, путем сравнения 14 испытуемых – 7 здоровых добровольцев (в возрасте от 21 до 75 лет, 4 мужчины и 3 женщины) и 7 пациентов с ишемией (в возрасте от 36 до 80 лет, 5 мужчин и 2 женщины). Пациентов с ишемией отбирали по длительности комплекса QRS аналогично здоровым и без изменений морфологии ST.

По результатам разница в длительности комплекса QRS между группами минимальна и не-

значительна. Низкочастотная традиционная ЭКГ не позволяет различить ишемическую патологию в этих группах. Иначе обстоит дело с СВЧ ЭКГ. У здоровых молодых добровольцев длительность комплексов заметно меньше, чем у пациентов с ишемией миокарда (таблица). Несмотря на небольшую выборку, результаты исследования показывают необходимость проведения дальнейших работ в данном направлении [9].

По предварительным результатам исследований P. Jurak и его команды в 2017 г. «Ventricular dyssynchrony assessment using ultra-high frequency ECG technique» пациентов ($n=10$), завершивших 6-месячное наблюдение, позволяют предположить, что диссинхрония, полученная с помощью СВЧ ЭКГ, позволяет правильно определить реагирующих или не реагирующих на тромболитическую терапию. Таким образом, диссинхрония, вызванная СВЧ ЭКГ, заслуживает внимания, и, учитывая также преимущества СВЧ ЭКГ, она может быть одним из наиболее значимых предикторов ответа на тромболитическую терапию [48].

В 2022 г. в работе K/ Saleh и его команды «Ultra-high-frequency ECG assessment of QRS fragmentation predicts sudden cardiac death risk in inherited arrhythmia syndromes» были опубликованы следующие результаты: 40 пациентов были отнесены к группе низкого риска, 20 – к группе высокого риска. СВЧ ЭКГ здоровых добровольцев показала равномерную активацию желудочков с одиночными пиками СВЧ в каждом из отведений. СВЧ ЭКГ пациентов с высоким риском показала множественные пики СВЧ, представляющие фрагментацию комплекса QRS. Максимальное количество пиков СВЧ в любом отведении использовалось для измерения степени фрагментации комплекса. Тяжесть фрагментации (количество пиков) коррелирует со статусом риска аритмии ($\chi^2=8,95$, $p=0,03$) для всех участников и при сравнении пациентов с высоким и низким риском наследственных заболеваний.

Таким образом, учёный со своей командой продемонстрировали доказательство концепции того, что новый сверхвысокочастотный инструмент для измерения широкого спектра высокочастотных компонентов комплекса QRS может быть использован для стратификации риска внезапной смерти у пациентов с наследственными заболеваниями сердца [49, 50].

Выводы. ЭКГ высокого разрешения в сравнении с ЭКГ стандартного разрешения является более

Таблица
QRS и длительность комплексов, измеренных с помощью усредненного сигнала 500 ударов сердца
Table
QRS and power envelope width in ms measured in averaged signal from 500 beats within each subject

	Healthy mean (n=7), M $\pm$ SD ms	P ANOVA	Ischemic mean, (n=7), M $\pm$ SD ms
QRS	87,1 $\pm$ 4,3	0,6	88,3 $\pm$ 3,3
150-250 Hz, foot	79,9 $\pm$ 8,5	0,02	113,1 $\pm$ 31,8
150-250 Hz, peak	52,9 $\pm$ 8,6	0,007	73,1 $\pm$ 14,4
250-500 Hz, foot	66,2 $\pm$ 7,7	0,03	82,9 $\pm$ 16,0
250-500 Hz, peak	51,6 $\pm$ 9,5	0,2	63,6 $\pm$ 19,1

чувствительным и специфическим методом исследования, который вкупе с другими неинвазивными методами позволяет с большей достоверностью определять жизнеугрожающие состояния (ЖТ, фибрилляции предсердия) на основе регистрации поздних потенциалов предсердий и желудочков. Данный метод позволяет регистрировать зоны сниженной амплитуды (RAZ зоны), которые могут иметь прогностическую значимость при определении ишемизированных зон миокарда, кроме этого, выходные данные могут быть предвестниками ППЖ и ППП. Внедрение данной улучшенной диагностики в клиническую практику повысит уровень качества оказания специализированной помощи, в перспективе снизит количество смертельных исходов от внезапной сердечной смерти и, вероятно, облегчит корректирование назначения средств при лекарственной терапии.

Прозрачность исследования. Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать.

Декларация о финансовых и других взаимоотношениях. Все авторы принимали участие в разработке концепции и дизайна исследования и в написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена. Авторы не получали гонорар за исследование.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Waller AD. A Demonstration on Man of Electromotive Changes accompanying the Heart's Beat. J Physiol. 1887;8(5):229-234. DOI:10.1113/jphysiol.1887.sp000257
2. Тетенов Ф.Ф., Степанисцева А.В. Истоки электрофизиологии и электрокардиографии // Бюллетень сибирской медицины. – 2014. – Т. 13, вып. 3. С.111-118. [Tetenev FF, Stepanisheva AV. Istoki elektrofiziologii i elektrokardiografii [Sources of the electrophysiology and electrocardiography]. Byulleten sibirskoj mediciny [Bulletin of Siberian Medicine]. 2014; 13 (3): 111-118. (In Russ.)]. DOI:10.20538/1682-0363-2014-3-111-118
3. Ослопов В.Н., Богоявленская О.В., Милославский Я.М. Инструментальные методы исследования сердечно-сосудистой системы: учебное пособие. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. – С. 17-21. [Osloпов VN, Bogoyavlenskaya OV, Miloslavskiy YaM. Instrumental'nyye metody issledovaniya serdechno-sosudistoy sistemy [Instrumental methods for studying the cardiovascular system]. Uchebnoe posobie M.: GEOTAR-Media [textbook. allowance M.: GEOTAR-Media]. 2012; 17-21. (In Russ.)].
4. Нестерова Е.А. Основы электрокардиографии. Нормальная ЭКГ // Кардиология: Новости. Мнения. Обучение. – 2016 – No 2(9) – С. 77-85. [Nesterova EA. Osnovy e'lektrokardiografii. Normal' naya EKG [Fundamentals of electrocardiography. Normal ECG]. Kardiologiya: Novosti. Mneniya. Obucheniye [Cardiology: News. Opinions. Education]. 2016; 2 (9): 77-85. (In Russ.)].
5. Ахутин В. М., Немирко А. П., Першин Н. Н., и др. Теория и проектирование диагностической электронно-медицинской аппаратуры: учеб. пособие, изд-во ЛГУ, 1980. – С. 116. [Ahutin VM, Nemirko AP, Pershin NN et al. Teoriya i proektirovaniye diagnosticheskoy elektronno-medicinskoj apparatur [Theory and engineering of diagnostic electronic medical equipment]. Uchebnoe posobie, izdatelstvo LGU [textbook. allowance Publishing house LGU]. 1980; 116. (In Russ.)].
6. Бенедиктова С.В., Жуков К.Н. Метод высокочастотной QRS электрокардиографии для улучшенной диагностики ишемической болезни сердца // Аллея науки. – 2017. – Т. 2, № 9. – С. 255-262. [Benediktova SV, Zhukov KN. Metod vysokochastotnoy QRS elektrokardiografii dlya uluchshennoy diagnostiki ishemicheskoy bolezni serdtsa [The method of high-frequency QRS electrocardiography for improved diagnosis of coronary heart disease]. Alleya nauki [Alley of Science]. 2017;2 (9): 255-262. (In Russ.)].
7. Коробейников А. В. Алгоритмы и комплексы программ мониторно-компьютерных систем для анализа морфологии и ритма электрокардиограмм // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2004. – С. 24. [Korobeinikov AV. Algoritmy i kompleksy program monitorno-komp'yuternykh sistem dlya analiza morfologii i ritma elektrokardiogramm [Algorithms and software complexes of monitor-computer systems for the analysis of the morphology and rhythm of electrocardiograms] Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences]. 2004; 24 p. (In Russ.)].
8. Коркушко О.В., Лишнева В.Ю., Бодрецкая Л.А. Предикторы частой суправентрикулярной экстрасистолии у больных старше 60 лет с ишемической болезнью сердца (результаты 3-летнего наблюдения) // Украинский кардиологический журнал. – 2010. – № 4. – С. 26-35. [Korkushko OV, Lishnevskaya VYu, Bodreckaya LA. Prediktory chastoj supraventrikulyarnoj ekstrasistolii u bol'nyh starshe 60 let s ishemicheskoy bolezn'yu serdca (rezul'taty 3-letnego nablyudeniya) [Predictors of frequent supraventricular extrasystole in patients older than 60 years with coronary heart disease (results of a 3-year follow-up)]. Ukrainskij kardiologicheskij zhurnal [Ukrainian Journal of Cardiology]. 2010; 4: 26-35. (In Russ.)].
9. Jurak P, Halamek J, Leinveber P, et al. Ultra-high-frequency ECG measurement. Computing in Cardiology. 2013; 40:783-786.
10. Beker A, Bregman-Amitai O, Zeltser A Apparatus and method for analysis of high frequency QRS complexes: US patent 8706201: A61B5 / 0472; Application filed by BSP Biological Signal Processing Ltd. - № US56730604P; 01.05.2005; 22.04.2014.
11. Toledo E, Beker A, Bregman-Amitai O Apparatus and method for identifying myocardial ischemia using analysis of high frequency QRS potentials: Patent № 8538510 A61B 5/04 U.S. /; BSP Biological Signal Processing Ltd. – № 38997570; 02.08.2007; 17.09.2013.
12. Baroja D Detección precoz de la cardiopatía isquémica] / Universidad de Zaragoza, Facultad de Medicina, 2015. <https://zaguan.unizar.es/record/47850/files/TAZ-TFG-2015-1028.pdf>
13. Trägårdh E, Schlegel TT. High-frequency QRS electrocardiogram. Clin Physiol Funct Imaging. 2007;27(4):197-204. DOI:10.1111/j.1475-097X.2007.00738.x
14. Фролов А.В. Использование биоэлектрического моделирования и электрокардиографии высокого разрешения для характеристики устойчивости сердечно-сосудистой системы // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия медицинских наук. – 2019. – No16(3). – С.271-282. [Frolov AV. Ispol'zovanie bioe'lektricheskogo modelirovaniya i e'lektrokardiografii vy'sokogo razresheniya dlya xarakteristiki ustojchivosti serdechno-sosudistoy sistemy] [Study of the stability of the cardiovascular system from the data of bioelectric modeling and high resolution electrocardiography]. Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya

- medicinskix nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Medical series]. 2019; 16 (3): 271-282. (In Russ.). DOI:10.29235/1814-6023-2019-16-3-271-282
15. Reichlin T, Abächerli R, Twerenbold R, et al. Advanced ECG in 2016: is there more than just a tracing? *Swiss Med Wkly*. 2016;146:w14303. DOI: 10.4414/sm.w.2016.14303
 16. Шурдумова М.Г. ЭКГ высокого разрешения в выборе антигипертензивной терапии у больных сахарным диабетом // Астраханский медицинский журнал. – 2014 – С.136-140. [Shurdumova MG. EKG vy'sokogo razresheniya v vy'bore antigipertenzivnoj terapii u bol'ny'x saxarnym diabetom [High-resolution ECG in the choice of antihypertensive therapy in patients with diabetes mellitus]. *Astrakanskij medicinskij zhurnal* [Astrakhan Medical Journal]. 2014: 136-140. (In Russ.).]
 17. Abboud S, Belhassen B, Miller HI, Sadeh D, Laniado S. High frequency electrocardiography using an advanced method of signal averaging for non-invasive detection of coronary artery disease in patients with normal conventional electrocardiogram. *J Electrocardiol*. 1986;19(4):371-80. DOI: 10.1016/s0022-0736(86)81065-2
 18. Schlegel TT, Brian A. System for the diagnosis and monitoring of coronary artery disease, acute coronary syndromes, cardiomyopathy and other cardiac conditions: U.S. Patent No. 7386340B2 A61B5/0472/ Assigned to national aeronautics and space administration, u.s. government as represented by the. - № US10/402866; 26.03.2003; 10.06.2008.
 19. Колосова К.С., Григорьева Н.Ю., Косюга Ю.И. Высокочастотная ЭКГ в выявлении ишемии миокарда, обусловленной стенозами правой коронарной артерии, у больных ИБС // Современные технологии в медицине. – 2020. – Т. 12, №1. – С. 86 – 91. [Kolossova KS, Grigoryeva NYu, Kosyuga Yul. Vysokochastotnaya EKG v vyjavlenii ishemii miokarda, obuslovlennoy stenozami pravoy koronarnoy arterii, u bol'nykh IBS [High-Frequency ECG for Detection of Myocardial Ischemia Associated with Right Coronary Artery Stenosis in IHD Patients]. *Sovremennyye tekhnologii v meditsine* [Modern technologies in medicine]. 2020; 12(1): 86-91. (In Russ.). DOI: 10.17691/stm2020.12.1.11
 20. Schlegel TT, Kulecz WB, DePalma JL, et al. Real-time 12-lead high-frequency QRS electrocardiography for enhanced detection of myocardial ischemia and coronary artery disease. *Mayo Clin Proc*. 2004;79(3):339-50. DOI: 10.4065/79.3.339
 21. Amit G, Granot Y, Abboud S. Quantifying QRS changes during myocardial ischemia: Insights from high frequency electrocardiography. *J Electrocardiol*. 2014;47(4):505-11. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2014.03.006
 22. Conti A, Bianchi S, Grifoni C, et al. High-frequency QRS analysis superior to conventional ST-segment analysis of women with chest pain. *Am J Emerg Med*. 2016;34(3):437-42. DOI: 10.1016/j.ajem.2015.11.044
 23. Balfour PC Jr, Gonzalez JA, Shaw PW, et al. High-frequency QRS analysis to supplement ST evaluation in exercise stress electrocardiography: Incremental diagnostic accuracy and net reclassification. *J Nucl Cardiol*. 2020;27(6):2063-2075. DOI: 10.1007/s12350-018-01530-w
 24. Колосова К.С., Григорьева Н.Ю., Косюга Ю.И. Высокочастотная электрокардиография как дополнительный метод диагностики ишемии миокарда у пациентов ИБС различного возраста // Южно-Российский журнал терапевтической практики. – 2020. – № 1(3) – С.63-67. [Kolossova KS, Grigoryeva NYu, Kosyuga Yul. Vysokochastotnaya elektrokardiografiya kak dopolnitel'nyy metod diagnostiki ishemii miokarda u patsiyentov IBS razlichnogo vozrasta. [Yuzhno-High-frequency electrocardiography as an additional method for diagnosing myocardial ischemia in IHD patients of various ages]. *Rossiyskiy zhurnal terapevticheskoy praktiki* [South Russian Journal of Therapeutic Practice]. 2020;1(3):63-67. (In Russ.). DOI: 10.21886/2712-8156-2020-1-3-63-67
 25. Rosenmann D, Mogilevski Y, Amit G, et al. High-frequency QRS analysis improves the specificity of exercise ECG testing in women referred for angiography. *J Electrocardiol*. 2013;46(1):19-26. DOI: 10.1016/j.jelectrocard.2012.08.007
 26. Легконогов А. В. Результаты и перспективы изучения поздних потенциалов желудочков // Кардиология. – 2012. – Т.10. – С. 57-65. [Legkonogov AV. Rezul'taty i perspektivy izucheniya pozdnykh potencialov zheludochkov [Results and prospects of studying late ventricular potentials]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 2012; 10: 57-65. (In Russ.).]
 27. Zheng J, Zhang J, Danioko S, et al. A 12-lead electrocardiogram database for arrhythmia research covering more than 10,000 patients. *Scientific Data*, 2020;7:48. DOI:10.1038/s41597-020-0386-x
 28. Simson MB Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction. *Circulation*. 1981;64(2):235-42. DOI: 10.1161/01.cir.64.2.235
 29. Berbari EJ Critical overview of late potential recordings. *Journal of electrocardiology*, 1987;20:125-127.
 30. Rubin DA, Sorbera C, Cook J, et al. Reversible late potentials due to ischemia. *PACE*. 1992; 15:2250–4. DOI: 10.1111/j.1540-8159.1992.tb04168.x
 31. Wong CB, Windle JR Clinical applications of signal-averaged electrocardiography in patients after myocardial infarction. *Nebraska Medical Journal*. 1994; 79(2):28-31.
 32. Rubal BJ, Bulgrin JR, Gilman JK. Time-frequency analysis of ECG for late potentials in sudden cardiac death survivors and post-myocardial infarction patients. *Biomedical Sciences Instrumentation*. 1995; 31:109-114.
 33. Palma Gamiz JL, Yuste Pescador P, Senor de Uria J, Gay I. Analysis of high frequency and low amplitude late potentials in the body surface electrocardiogram, in acute and chronic stages of ischemic cardiopathy. (Span ish). *Archivos del Instituto de Cardiologia de Mexico*. 1990; 60(I):39-44.
 34. Roithinger FX, Punzengruber C, Rossoll M, et al. Ventricular late potentials in haemodialysis patients and the risk of sudden death. *Nephrology, Dialysis, Transplantation*. 1992; 7(10):1013–1018.
 35. Maki H, Ozawa Y, Tanigawa N, et al. Effect of reperfusion by direct percutaneous transluminal coronary angioplasty on ventricular late potentials in cases of total coronary occlusion at initial coronary arteriography. *Japanese circulation journal*. 1993;57(3):183-8. DOI: 10.1253/jcj.57.183
 36. Zaman AG, Morris JL, Smyllie JH, et al. Late potentials and ventricular enlargement after myocardial infarction. A new role for high-resolution electrocardiography? *Circulation*. 1993; 88(3):905–914. DOI: 10.1161/01.cir.88.3.905
 37. Галевич А.С., Камалов Г.М., Поздние потенциалы желудочков // Казанский медицинский журнал. – 1993. – Т.74, №5. – С.368-369. [Galyavich AS, Kamalov GM. Pozdnie potencialy zheludochkov [Late potentials of the ventricles]. *Kazanskij Medicinskij zhurnal* [Kazan medical journal]. 1993;74(5):368-369. (In Russ.).]
 38. Моршкин В.С., Гусаров Г.В. Возможности поверхностного картирования ЭКГ в оценке изменений процессов деполяризации предсердий у больных с гипертонической болезнью и гипертрофической кардиомиопатией // Кардиология. – 1997. – Т. 37, № 5. – С. 71-72. [Moroshkin BC, Gusarov GV. Vozmozhnosti poverhnostnogo kartirovaniya EKG v ocenke izmeneniy protsessov depolyarizatsii predserdiy u bol'nykh s hipertонической болезнью и гипертрофической кардиомиопатией // Кардиология. – 1997. – Т. 37, № 5. – С. 71-72. [Moroshkin BC, Gusarov GV. Vozmozhnosti poverhnostnogo kartirovaniya EKG v ocen-

- ke izmenenij processov depolyarizacii predserdij u bol'nyh s gipertonicheskoj boleznyu i gipertroficheskoj kardiomiopatiej [Possibilities of surface ECG mapping in assessing changes in atrial depolarization processes in patients with hypertension and hypertrophic cardiomyopathy]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 1997; 37(5):71-72. (In Russ.).
39. Морошкин В.С., Гусаров Г.В., Антонова И.С., и др. Связь поздних желудочковых потенциалов с нарушениями ритма и проводимости у больных с ишемической болезнью сердца // Вестник аритмологии. – 1997. – № 6. – С.24-27 [Moroshkin BC, Gusarov GV, Antonova IS, et al. Svyaz' pozdnyh zheludochkovykh potencialov s narusheniyami ritma i provodimosti u bol'nyh s ishemicheskoy boleznyu serdca [Relationship of late ventricular potentials with rhythm and conduction disturbances in patients with coronary heart disease]. *Vestnik aritmologii* [Bulletin of Arrhythmology]. 1997; 6:24-27. (In Russ.)].
 40. Жалюнас Р., Бражджените Ю., Блужайте И. и др. Поздние потенциалы желудочков в остром и восстановительном периодах инфаркта миокарда // Кардиология. – 1991. – Т. 31, № 2. – С. 56-59. [Zhalyunas R, Brazhdzenite Yu, Wander I, et al. Pozdnie potencialy zheludochkov v ostrom i vosstanovitel'nom periodah infarkta miokarda [Late ventricular potentials in acute and recovery periods of myocardial infarction]. *Kardiologiya* [Cardiology]. 1991; 31(2):56-59 (In Russ.)].
 41. Диагностика и лечение больных острым инфарктом миокарда с подъемом сегмента ST на ЭКГ: Российские рекомендации // Приложение к журналу Кардиоваскулярная терапия и профилактика. – 2007. – Т.6(8), прил. 1. – С.415-500. [Diagnostika i lechenie bol'nyh ostrym infarktom miokarda s pod'emom segmenta ST na EKG [Diagnosis and treatment of patients with acute myocardial infarction with ST-segment elevation on ECG]. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika Prilozhenie 1* [Cardiovascular therapy and prevention. Supplement 1]. 2007; 6 (8), Suppl 1: 415-500 (In Russ.)]. DOI: 10.15829/1728-8800-2007-0
 42. Priori SG, Blomström-Lundqvist C, Mazzanti A, et al. ESC Scientific Document Group. 2015 ESC Guidelines for the management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death: The Task Force for the Management of Patients with Ventricular Arrhythmias and the Prevention of Sudden Cardiac Death of the European Society of Cardiology (ESC). Endorsed by: Association for European Paediatric and Congenital Cardiology (AEPC). *Eur Heart J*. 2015;36(41):2793-2867. DOI: 10.1093/eurheartj/ehv316
 43. Богатырева М. М-Б. Поздние потенциалы желудочков: значимость в клинической практике // Международный журнал сердца и сосудистых заболеваний. – 2018. – Т. 6, №20. – С.4-14. [Bogatyeva MM-B. Pozdnie potencialy zheludochkov: znachimost' v klinicheskoy praktike. *Mezhdunarodnyj zhurnal serdca i sosudistyh zabolevanij* [Late ventricular potentials and their significance for clinical practice]. *Mezhdunarodnyj zhurnal serdca i sosudistyh zabolevanij* [International Journal of Heart and Vascular Diseases]. 2018; 6(20):4-14. (In Russ.)].
 44. Incze A, Cotel S, Carasca E. The prognostic value of late ventricular potentials for sudden death. *Romanian Journal of Internal Medicine*. 1992;30(4):257-260.
 45. Lee JM, Chung H, Kim HO. Ventricular late potentials measured by signal-averaged electrocardiogram in young professional soccer players. *Int J Arrhythm*. 2021;22 (3): <https://arrhythmia.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42444-021-00031-1>, DOI:10.1186/s42444-021-00031-1
 46. Jurak P, Leinveber P, Plesinger F. Ultra-High-Frequency Electrocardiography. *Computing in Cardiology*. 2021; 48. DOI:10.22489/CinC.2021.093
 47. Jurak P, Curila K, Leinveber P. Novel ultra-high-frequency electrocardiogram tool for the description of the ventricular depolarization pattern before and during cardiac resynchronization. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology* 2019; 31(1):300-307. DOI: 10.1111/jce.14299
 48. Jurak P, Halamek J, Meluzin J. Ventricular dyssynchrony assessment using ultra-high frequency ECG technique. *J Interv Card Electrophysiol*. 2017; 49:245–254. DOI:10.1007/s10840-017-0268-0
 49. Saleh K, Varnava A, Shun-Shin MJ, et al. Ultra-high-frequency ECG assessment of QRS fragmentation predicts sudden cardiac death risk in inherited arrhythmia syndromes. *European Heart Journal* 2022; 43:678. DOI:10.1093/eurheartj/ehac544.678
 50. Chowdhury MH, Cheung RCC. Reconfigurable Architecture for Multi-lead ECG Signal Compression with High-frequency Noise Reduction. *Sci Rep*. 2019; 9(1):17233. DOI:10.1038/s41598-019-53460-3