

С.А.Бойцов, С.Л.Гришаев, О.Л.Тищенко, В.Н.Солнцев, А.Н.Пинегин

## НОВЫЙ МЕТОД ОПИСАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ ЭКГ ВР И ОЦЕНКА ЕГО ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.

*Военно-медицинская академия, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

*Предложен новый метод описания результатов спектрально-временного картирования ЭКГ высокого разрешения и уравнение дискриминантной функции для диагностики ИБС.*

**Ключевые слова:** ЭКГ высокого разрешения, спектрально-временное картирование.

*The new technique of spectral-temporal analysis results interpretation with Fourier Transform and discriminator equation for CAD diagnosis was recommended.*

**Key words:** high resolution ECG, spectral-temporal analysis.

К настоящему времени понятно, что достигнут определенный предел диагностических возможностей метода стандартной ЭКГ по выявлению скрытых ишемических изменений в миокарде. В связи с этим продолжается поиск новых методов, в том числе все более широкое применение находит метод ЭКГ высокого разрешения (ЭКГ ВР). Полученные в последние годы результаты позволяют утверждать, что этот метод обладает более широкими диагностическими возможностями по сравнению с ЭКГ, но основной объем проводимых исследований, главным образом, посвящен изучению электрической нестабильности миокарда и анализу поздних потенциалов желудочков (ППЖ) и предсердий (ППП) по методу Симсона [11].

Другой метод, спектральный анализ (frequency-domain), оценивает изменения амплитудно-частотных характеристик определенного участка кардиосигнала [8]. Наиболее часто для спектрального анализа используют метод быстрого преобразования Фурье (БПФ), с помощью которого сигнал можно разложить на составляющие его колебания различной частоты и амплитуды. Основное требование при использовании БПФ - сигнал должен быть периодическим и непрерывным. Для удовлетворения этого условия применяют функцию "окна": выделяют интервал ЭКГ-сигнала (конечная часть комплекса QRS и начало сегмента ST), в котором при временном анализе определяют признаки ППЖ. Одновременно допускается, что это выбранное "окно" ЭКГ-сигнала постоянно повторяется без прерывания другими зубцами (Р, Т), комплексом QRS и изоэлектрическим интервалом Т-Р [9].

Спектрально-временное картирование (СВК), или спектральное картирование множественных сегментов (spectral-temporal mapping), одним из первых применил R.Haberl [4, 5]. Принцип метода заключается в вычислении спектра движущегося во временной оси "окна" в конечной части QRS и сегменте ST. По результатам расчетов строится трехмерный график частоты, времени и амплитуды. Вычисляется спектральная энергия при проведении БПФ 25 сегментов длиной 80 мс, смещенных на 3 мс друг от друга. В ранних работах по данной методике первый сегмент начинался на 52-й мс после окончания

QRS, а последний - в 20 мс до него. Определялась степень корреляции между значениями частотного спектра 2- 25 и первого сегмента. Коэффициенты корреляции указывали на степень схожести спектральных карт: нулевой коэффициент - две карты непохожи, единица при идентичности карт. Вычислялся фактор нормальности (ФН) - соотношение между средним значением коэффициентов корреляции пяти последних сегментов и остальных, выраженное в процентах. Критерием наличия ППЖ являлось низкое значение ФН (менее 30%) в любом из X, Y, Z и в векторно суммированном отведении.

Основным недостатком методов спектрального анализа и традиционного варианта СВК ЭКГ ВР является то, что изучению подвергаются только конечные части комплекса QRS и зубца Р, в то время как диагностическая значимость спектрально-временных карт остальных элементов электрокардиограммы остается практически не исследованной. Другим недостатком является сложность восприятия получаемых результатов и, в силу этого, отсутствие единого стандарта их описания.

Целью настоящего исследования явилась разработка нового метода описания спектрально-временных характеристик электрофизиологических процессов в миокарде и оценка эффективности метода в дифференциальной диагностике нормы и начальных стадий ИБС.

### МАТЕРИАЛИ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Обследовано 300 лиц мужского пола. Все обследованные были разделены на 3 большие группы. В состав первой группы (100 человек) вошли здоровые лица, принадлежащие к условно младшей возрастной группе (17-25 лет). В состав второй группы были включены всего 50 человек принадлежащие к условно средней возрастной группе без признаков поражения сердечно-сосудистой системы в возрасте от 35 до 45 лет (средний возраст  $31,5 \pm 6,2$  лет). В состав третьей группы были включены 150 больных ИБС, стабильной стенокардии напряжения I-II ФК (в соответствии с Канадской классификацией 1985 г.). Хроническая коронарная недостаточность была верифицирована у всех больных ИБС методом велоэргометрии или ЧПЭКС.

ЭКГ ВР регистрировалась с помощью аппаратуры фирмы "Geolink-Elertronics" с последующей обработкой пакетом программ, разработанных в лаборатории компьютерных технологий в медицине Факультета фундаментальной медицины МГУ им. М.В.Ломоносова. В этом пакете реализован метод СВК ЭКГ ВР, похожий на метод Габора, предшественника wavelet-анализа, который заключается в оконном (с окном Парзена) преобразовании Фурье последовательных отрезков сигнала предварительно усредненной ЭКГ и построении карты, показывающей зависимость амплитуды от времени и частоты с последующим изучением ее структуры. Применялась узкополосная фильтрация сигнала для 25-50 значений частоты с подавлением второй и последующей гармоник. Программа позволяет проводить спектральный анализ различных участков кардиоцикла (зубцы Р и Т, комплекс QRS) с выделением временных, амплитудных и частотных характеристик любого выбранного в нем интервала и возможностью построения 2-х и 3-х мерных графиков.

Для анализа ЭКГ использовали показатели длительность зубца Р и комплекса QRS в мс, амплитуда зубца Р мВ и индекса Соколова-Лайона. Велоэргометрию (ВЭМ) проводили в стандартном варианте диагностической пробы. Нагрузку задавали непрерывно и повышали ее ступенчато. Длительность каждой ступени -5 мин. Мощность нагрузки на первой ступени -75 Вт, на второй -125 Вт, на третьей -150 Вт. Использовался временной анализ ЭКГ ВР по Симсону для выявления ППП и ППЖ. Ультразвуковое исследование сердца осуществлялось на аппарате Sigma-Iris 880 фирмы "CONTRON" в М- и D- режимах. Определялись следующие показатели: конечно-систолический размер левого желудочка, конечно-диастолический размер левого желудочка, размер предсердий, размер правого желудочка, толщина межжелудочковой перегородки и задней стенки левого желудочка. Суточное мониторирование ЭКГ проводилось с использованием комплекса Кардиотехника-4000 фирмы ИНКАРТ. Была использована стандартная методика ЧПЭКС. Первая ступень стимуляции проводилась при частоте 100 имп. в 1 мин. с последующем увеличением до планируемой субмаксимальной ЧСС на 20 имп. По ходу исследования по стандартной методике проводилась оценка АВ-проведения, основанная на определении эффективного рефрактерного периода АВ-соединения и точки Венкебаха.

Были использованы следующие статистические процедуры: одномерный и двумерный разведочный анализ, одномерный дисперсионный анализ, корреляционный, линейный регрессионный, кластерный и факторный анализы. Диагностическая процедура строилась методом дискриминантного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При спектрально-временном картировании зубца Р начало шкалы времени программно совмещается с началом зубца Р, т.е. с моментом окончания возбуждения синусового узла. Конец зубца Р тоже автоматически фиксируется программой и соответствует моменту окончания процессов электрического возбуждения левого предсердия. Общая длительность зубца Р варьирует в пределах 70-120 миллисекунд в зависимости от размеров предсердий.

Существует физиологическое обоснование разделения времени регистрации зубца Р на три отдельных временных интервала, примерно равных по длительности. В первом интервале доминируют процессы возбуждения правого предсердия. Длительность этого интервала в среднем составляет 30-35 миллисекунд [1, 7]. После него, во втором интервале, развиваются процессы возбуждения межпредсердной перегородки. Третий интервал соответствует процессам возбуждения в левом предсердии. Длительность каждого из этих интервалов также составляет в среднем 30-35 миллисекунд [2, 6]. Точные значения этих интервалов устанавливались индивидуально для каждого пациента в процессе исследования зубца Р посредством разделения его длительности на три равных части.

Точно так же, как и для зубца Р, физиологически обосновано разделение длительности комплекса QRS на три временных периода. Начало шкалы времени для выделения этих интервалов определяется программно и физиологически соответствует моменту перехода электрического возбуждения с атрио-вентрикулярного узла на межжелудочковую перегородку. Первый период охватывает процессы возбуждения межжелудочковой перегородки и части миокарда правого желудочка. Его длительность, в среднем, близка к 30 миллисекундам [2, 10]. Второй период соответствует процессам возбуждения основной массы правого желудочка, верхушки, передних и боковых отделов левого желудочка. Его длительность составляет, в среднем, 40-45 миллисекунд. Наконец, третий временной интервал охватывает процессы возбуждения задне-диафрагмальных отделов левого желудочка. Его длительность, в среднем, составляет 40-45 миллисекунд. Конец комплекса QRS определяется программой автоматически и соответствует полному охвату электрическим возбуждением задне-диафрагмальных и базальных отделов левого желудочка.

Сущность предложенного алгоритма анализа спектрально-временной карты состоит в том, что весь анализируемый частотный диапазон был разделен на три части: низкочастотную, среднечастотную и высокочастотную [3]. Границы между этими диапазонами выбраны по следующей схеме: до 30 герц, 30 - 60 герц и 60 - 100 герц - для зубца Р и до 40 герц, от 40 до 90 герц и 90 - 150 герц - для комплекса QRS, соответственно. Низкочастотный диапазон содержит набор частот, описывающих движение суммарного вектора процесса электрического возбуждения предсердий и желудочков. Появление дополнительных экстремумов в этом частотном диапазоне, как показали предварительные исследования, возможно обусловлено наличием значительных изменений размеров камер сердца и толщины их стенок. Целесообразность выделения среднечастотного диапазона обусловлена тем, что в этой полосе частот наиболее часто встречаются экстремумы у здоровых людей. Причины этого, вероятно, обусловлены естественными анатомическими образованиями. Соответственно, выделение высокочастотного диапазона как для зубца Р, так и для комплекса QRS согласно собственным данным, необходимо в связи с тем, что в этой полосе частот появляются экстремумы, ассоциированные с нарушениями сердечного ритма.

Таким образом, спектрально-временная карта зубца Р и комплекса QRS оказывается разделенной сеткой координат на 9 самостоятельных сегментов, кроме того, анализируются амплитуды спектральных максимумов. Были выделены два уровня амплитудных характеристик. Низкоамплитудный - составлял до 20 мкВ для зубца Р и до 40 мкВ для комплекса QRS, высокоамплитудный - выше этих показателей. Низкоамплитудный диапазон выделен на основании результатов проведенных исследований, которые показали, что при патологии характерно появление именно таких экстремумов [1, 3].

Таким образом, всё анализируемое частотно-амплитудно-временное пространство разделено на 18 дискретных объемных ячеек. Предложенная методика предполагает подсчет количества пиков в каждой ячейке. Суммарное количество отдельных информационных ячеек для СВ карты зубца Р и комплекса QRS составляет 36.

В отличие от всех известных работ, в которых применялся метод СВК, в данной работе для дальнейшего анализа использовались не конкретные значения частоты, момента появления и амплитуды каждого выявленного пика, а только сам факт попадания этого пика в конкретную информационную ячейку. Информационной характеристикой в данной ситуации являлось количество пиков, локализованных, в данной ячейке. Предполагается, что все пики, находящиеся в одной ячейке, имеют единый физиологический или патофизиологический генез.

Сравнительный анализ распределения выборочных средних значений числа пиков по ячейкам спектрально-временной карты зубца Р и комплекса QRS для группы здоровых и больных ИБС позволил выявить ряд закономерностей. В карте зубца Р у больных ИБС происходит смещение пиков в высокочастотный диапазон и последнюю треть с одновременным увеличением их числа. В карте комплекса QRS у больных ИБС увеличивается число пиков в среднечастотном и особенно высокочастотном диапазонах для всех временных интервалов.

Результаты кластерного и факторного анализов подтвердили однородность исходных групп пациентов с точки зрения наличия выбросов или группировок в совокупности исходных параметров.

Таким образом, по результатам исследования повторяемости для группы здоровых лиц выявлена устойчивая картина распределения числа пиков по отдельным

информационным ячейкам спектрально-временные карты зубца Р и комплекса QRS. При этом для здоровых лиц различных возрастных категорий (при сравнении 1 и 2 группы) выявлены свои характерные особенности распределения частотных пиков, имеющие стабильный характер, что позволило построить нормативные спектрально-временные карты для разных возрастных категорий здоровых лиц. Спектрально-временные карты для зубца Р и комплекса QRS у лиц 1 группы представлены на рис. 1 и 2.

Для 3 группы больных ИБС при исследовании повторяемости картины СВК выявлена неустойчивость распределения числа пиков по отдельным информационным ячейкам спектрально-временных карт зубца Р и комплекса QRS как в отношении каждого конкретного больного, так и в отношении всей совокупности больных данной группы.

Дальнейшим этапом работы явилось исследование возможности диагностики ИБС с начальными клиническими проявлениями на основании предложенной системы дискретных показателей. Для этого, помимо параметров СВК анализировался массив дополнительных параметров, полученных с помощью других общепринятых методик. Основным формальным методом построения количественной процедуры дифференциальной диагностики явился линейный дискриминантный анализ. Было проведено исследование различных вариантов построения диагностической процедуры ИБС с начальными клиническими проявлениями. Основные полученные результаты были следующие:

Использование полного набора 35 показателей (СВК и дополнительных неинвазивных методов исследования сердечно-сосудистой системы) дает высокую чувствительность выявления ИБС-98%.

Использование только 17 показателей СВК (табл.1) также дает достаточно высокий уровень чувствительности-93%, при предсказывающей ценности положительного результата-91% и предсказывающей ценности отрицательного результата-89%.

Оптимальный набор из 22 показателей дает чувствительность метода, равную 97%. В этот набор входит 16 наиболее информативных показателей СВК, длительность и амплитуда зубца Р, индекс Соколова-Лайона и размеры желудочков по данным ЭхоКГ (табл.2).

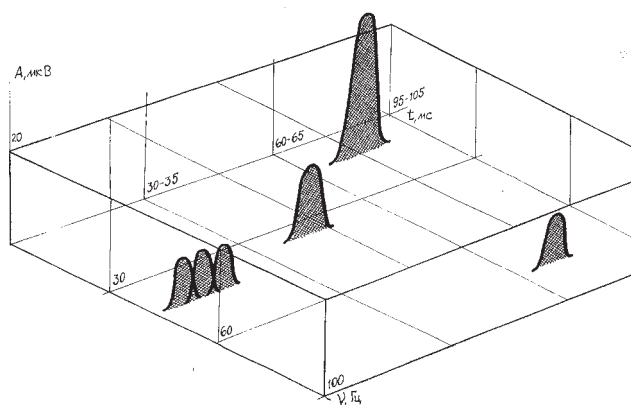


Рис. 1. Принцип описания спектрально-временной карты зубца Р.

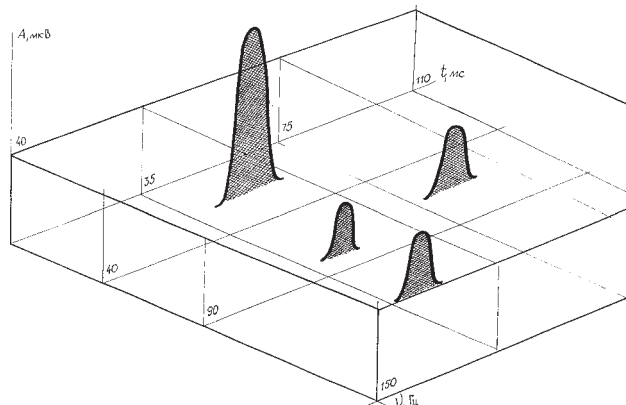


Рис. 2. Принцип описания спектрально-временной карты комплекса QRS.

Таблица 1.

## Оптимальный набор признаков спектрально-временной карты.

№	Признак	Содержание признака	Границы разделения
1	P11	Количество экстремумов в 1-й трети	до 30 Гц
2	P12	Количество экстремумов в 1-й трети	30 - 60 Гц
3	P13	Количество экстремумов в 1-й трети	60 - 100 Гц
4	P21	Количество экстремумов во 2-й трети	до 30 Гц
5	P22	Количество экстремумов во 2-й трети	30 - 60 Гц
6	P23	Количество экстремумов во 2-й трети	60 - 100 Гц
7	P31	Количество экстремумов в 3-й трети	до 30 Гц
8	P32	Количество экстремумов в 3-й трети	30 - 60 Гц
9	P33	Количество экстремумов в 3-й трети	60 - 100 Гц
10	Q11	Количество экстремумов в 1-й трети	До 40 Гц
11	Q12	Количество экстремумов в 1-й трети	40 - 90 Гц
12	Q13	Количество экстремумов в 1-й трети	90 - 150 Гц
13	Q21	Количество экстремумов во 2-й трети	До 40 Гц
14	Q22	Количество экстремумов во 2-й трети	40 - 90 Гц
15	Q23	Количество экстремумов во 2-й трети	90 - 150 Гц
16	Q32	Количество экстремумов в 3-й трети	40 - 90 Гц
17	Q33	Количество экстремумов в 3-й трети	90 - 150 Гц

Процедура диагностики ИБС по оптимальному набору показателей строилась следующим образом:

1. Индекс зубца P (PS):  
 $PS = 12 \times P11 + 13 \times P12 + 19 \times P13 + 16 \times P21 + 14 \times P22 + 16 \times P23 + 18 \times P31 + 20 \times P32 + 21 \times P33$
2. Индекс комплекса QRS (QS):  
 $QS = 17 \times Q12 + 26 \times Q13 + 58 \times Q21 + 20 \times Q22 + 12 \times Q23 + 15 \times Q32 + 26 \times Q33$
3. Индекс дополнительных показателей (ADD):  
 $ADD = 1155 \times PPI + 391 \times PAI + 59 \times QSP + 102 \times QDL - 100 \times QSL - 9 \times SLI$
4. Уравнение дискриминантной функции:  
 $DF = PS + QS + ADD - 575$   
 $DF < 0$  - "здоров",  $DF = 0$  - "ИБС"

Анализ построенной оптимальной дискриминантной функции показал, что в дискриминантную функцию входит больше показателей, относящихся к спектрально-временной карте зубца P, чем комплекса QRS. Это может быть связано с тем, что на начальной стадии ИБС именно в предсердиях наиболее выражены нарушения электрофизиологических процессов [6].

Таблица 2.

## Оптимальный набор дополнительных параметров.

№	Признак	Информативный параметр
1	PPI	Длительность зубца P по ЭКГ, мс
2	PTA	Амплитуда зубца P по ЭКГ, мкВ
3	SLI	Индекс Соколова-Лайона по ЭКГ
4	OSP	Размер правого желудочка по ЭхоКГ
5	ODL	Конечный диастолический размер левого желудочка по ЭхоКГ
6	OSL	Конечный систолический размер левого желудочка по ЭхоКГ

Возможно вследствие того, что масса миокарда в предсердиях значительно меньше, чем в желудочках и нарушения электрофизиологических процессов вследствие кардиосклероза и ишемии могут быть нивелированы в меньшей степени. Также это может быть обусловлено относительно большей выраженностью гемодинамических нарушений в предсердиях вследствие диастолической дисфункции левого желудочка. Гистограммы значений дискриминантной функции между группами 2 и 3 приведены на рис 3.

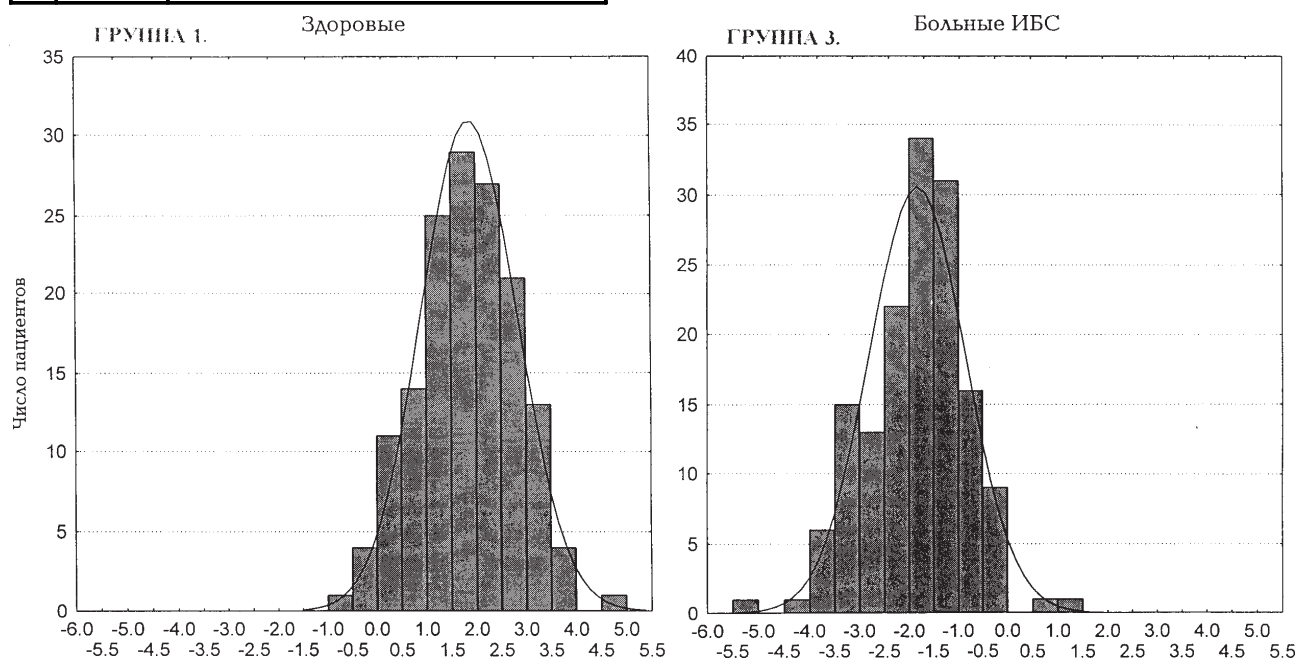


Рис. 3. Гистограммы значений дискриминантной функции по оптимальному набору показателей. Линией показана аппроксимация нормального распределения.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика описания спектрально-временных карт зубца Р и комплекса QRS позволяет получить способ количественной оценки распределения частотных пиков в системе пространственно-временных ячеек, отражающих основные электрофизиологические процессы возбуждения миокарда предсердий и желудочков.
2. Для группы больных с начальными клиническими проявлениями ИБС при исследовании повторяемости картины спектрально-временных карт выявлена неустойчивость распределения числа экстремумов по отдельным информационным ячейкам карт зубца Р и комплекса QRS как в отношении одного больного, так и в отно-

шении всей совокупности больных данной группы. По всей видимости, это является следствием нарушения хода нормальных электрофизиологических процессов в предсердиях и желудочках.

3. На основе анализа результатов СВК ЭКГ ВР выведено уравнение дискриминантной функции, применимое для построения процедуры диагностики ИБС с начальными клиническими проявлениями. Методика СВК ЭКГ ВР на основе предложенной схемы описания частотно-временных характеристик позволяет диагностировать ИБС; стенокардию напряжения I ФК с чувствительностью - 93 % при предсказывающей ценности положительного результата - 91 %, предсказывающей ценности отрицательного результата - 80 %.

## ЛИТЕРАТУРА.

1. Бойцов С.А., Тищенко О.Л., Недошивин К.Ю. Анализ сигнал-усредненной ЭКГ (по данным временного и спектрально-временного картирования) у больных гипертонической болезнью. // Артериальная гипертензия (приложение): СПб., 1997.-Т.3, №1.-С.22-23.
2. Blaszyk K., Kulakowski P., Poloniecki J. et al. Spectral temporal mapping versus time domain-analysis of the signal averaged electrocardiogram: reproducibility of results. // European Heart J., 1992., V.13., Abstract suppl., p.646.
3. Boitsov S.A. Spectral-temporal mapping of P-wave and QRS complex at the healthy persons and the patients with coronary artery disease. // International congress of physiological sciens.-Helsinki.-1997.-Vol.12.-P.197.
4. Haberl R., Jilge G., Pulter R., Steinbeck G. Comparison of frequency and time-domain analysis of the signal averaged electrocardiogram in patients with ventricular tachycardia and coronary artery disease: methodologic validation and clinical relevance // JACC - 1988 - Vol.12 - P.150-158.
5. Haberl R., Jilge G., Pulter R., Steinbeck G. Spectral mapping of the electrocardiogram with Fourier transform for identification of patients with sustained ventricular tachycardia and coronary artery disease // Europ. Heart J. - 1989 - Vol.10 - P.316-322.
6. Lander P., Berbary E.J., Rajagopalan C.V. et al. Critical analysis of the signal-averaged electrocardiogram (Improved identification of late potentials). // Circulation. 1993 - Vol. 87 - P.105-117.
7. Makfarlane P.W. A comparison of different processing techniques for measuring late potentials. // The proceedings of the international symposium on high-resolution ECG. Yokohama. Japan. July 3 - 1994 - P.136
8. Meste O., Rix H., Caminal P., Thakor N. Ventricular Late Potentials Characterisation in Time-Frequency Domain by Means of a Wavelet Transform. // IEEE Transaction on Bio-medical Engineering. Vol. 41 N7 July 1994. p.625-633.
9. Novak P., Zhixing L., Novak V., Natala R. Time frequency mapping of the QRS Complex in Normal Subjects and in Postmyocardial Infarction Patients. // J.of Electrocardiology Vol. 27 N1. 1994. p.49-60.
10. Simson M.B., Euler D., Michelson E.L. Detection of delayed ventricular activation on the body surface in dogs. // Am.J.Physiol. 1981., V.241., H363-369.
11. Simson M.B. Use of signal in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction. // Circulation 1981; 64:235-242.

### НОВЫЙ МЕТОД ОПИСАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННОГО КАРТИРОВАНИЯ ЭКГ ВР И ОЦЕНКА ЕГО ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.

*С.А.Бойцов, С.Л.Гришаев, О.Л.Тищенко, В.Н.Солнцев, А.Н.Пинегин*

Обследовано 150 больных с ИБС (возраст 45-65 лет) и 150 здоровых мужчин (возраст 17-45 лет). Проводилось стандартное ЭКГ исследование, запись сигнал усредненной ЭКГ высокого разрешения, ее спектрально-временной анализ и ультразвуковое исследование сердца. Был предложен новый метод описания результатов спектрально-временного картирования ЭКГ ВР. Выведено уравнение дискриминантной функции для диагностики ИБС. Чувствительность метода составляет 93%.

### THE NEW TECHNIQUE OF SPECTRAL-TEMPORAL MAPPING HR ECG RESULTS DESCRIPTION AND ITS DIAGNOSTIC EFFECTIVENESS EVALUATION.

*S.A.Boitsov, S.L.Grishaev, O.L.Tishchenko, V.N.Solntsev, A.N.Pinegin*

150 patients (age 45-65) with coronary artery disease and 150 healthy men (age 17-45) were examined using 12-lead ECG, High Resolution Signal-Averaged ECG (HRSAECG), spectral-temporal analysis and echocardiography. The new technique of spectral-temporal analysis results interpretation with Fourier Transform was recommended. Sensitivity of method was 93 %.