

С.А.Бойцов, С.Л.Гришаев, В.Н.Солнцев, Ю.С.Кудрявцев

АНАЛИЗ СИГНАЛ-УСРЕДНЕННОЙ ЭКГ (ПО ДАННЫМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ) У ЗДОРОВЫХ И БОЛЬНЫХ ИБС.

Российская Военно-медицинская академия, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

Изучены возможности использования вейвлет-преобразования комплекса QRS электрокардиосигнала полученного при регистрации сигнал-усредненной ЭКГ высокого разрешения для диагностики ИБС.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, электрокардиосигнал, сигнал-усредненная ЭКГ высокого разрешения, ИБС.

The potentialities of use of wavelet-transformation of the electrocardiogram QRS-complex obtained in the course of the signal-averaged high resolution ECG recording for the coronary artery disease diagnostics were studied.

Key words: wavelet-transformation, electrocardiosignal, signal-averaged high-resolution ECG, coronary heart disease.

В настоящее время, в связи с ростом числа больных ишемической болезнью сердца и инвалидизацией лиц трудоспособного возраста появилась настоятельная необходимость поиска новых методов ранней доклинической диагностики ишемических изменений миокарда. Эти методики должны удовлетворять ряду требований: иметь достаточно высокую чувствительность и специфичность, возможность использования в амбулаторных условиях и невысокие временные и финансовые затраты при проведении скрининговых исследований.

Метод стандартной ЭКГ и проведение нагрузочных проб к настоящему времени достигли определенных пределов своих диагностических возможностей по выявлению скрытых ишемических изменений миокарда. При хронических формах ИБС, а тем более на начальных её стадиях использование обычной электрокардиографии в покое, как правило, не выявляет отклонений от нормы. В тоже время, есть основания предположить, что уже в этот период имеют место изменения частотных и временных характеристик электрических потенциалов сердца, не регистрируемые с помощью обычного электрокардиографа [2, 3].

В связи с этим, большой интерес представляют новые методы регистрации и обработки ЭКГ-сигнала, в их числе электрокардиография высокого разрешения (ЭКГ-ВР) позволяющая выделять высокочастотные низкоамплитудные компоненты ЭКГ-сигнала несущие дополнительную информацию о распространении возбуждения по волокнам миокарда. Для обработки полученных сигналов используются такие способы, как временной анализ по методу Симсона — главным образом используемый для выявления электрической нестабильности миокарда и обнаружения поздних потенциалов предсердий и желудочков [8, 9].

Принципиально новые возможности открываются в случае применения к сигналу ЭКГ современных математических методов анализа, основанных на представлениях сигнала в виде разложений в некоторых обобщённых векторных пространствах. Наиболее известным примером такого разложения является преобразование Фурье, реализуемое чаще всего как быстрое преобразование Фурье (FFT — Fast Fourier Transform). Применение временного “окна” позволяет оценить изменение спектра сигнала в

различных фазах кардиоцикла. Этот метод получил название спектрально-временного картирования (СВК) - Spectral-temporal mapping. Данная методика приобрела в настоящее время довольно широкое распространение [1, 5]. Вместе с тем, в ней остаются нереализованными все потенциальные возможности метода СВК и в первую очередь в силу естественных недостатков стандартного Фурье-анализа. Дело в том, что метод использует фиксированное “окно”, которое не может быть адаптировано к локальным свойствам сигнала. В результате на низкочастотном участке спектра теряется разрешение по частоте, а на высокочастотном — по времени.

Для разрешения этого противоречия в современной математике разработан ряд методов анализа нестационарных сигналов (к этому классу сигналов относятся и ЭКГ). Наибольшую известность получило так называемое вейвлет-преобразование (Wavelet-transform). Оно представляет собой разложение сигнала по набору базисных функций, которые определены на интервале, более коротком, чем длительность кардиосигнала [3]. При этом все функции набора порождаются с помощью двухпараметрического преобразования (сдвига по оси времени и изменения масштаба) одной исходной функции, называемой “материнской”. Они называются вейвлетами (в переводе — короткие волны или всплески). Большие значения параметра масштаба соответствуют применению к исходному сигналу фильтра низких частот, малые значения — фильтра высоких частот [4, 6]. От преобразования Фурье вейвлет-преобразование отличается тем, что операция умножения на “окно” содержится в самой базисной функции, при этом происходит адаптация “окна” к сигналу при изменении масштаба.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Обследовано 156 мужчин и женщин. Все обследованные были разделены на 3 большие группы. В состав первой группы (26 человек) вошли здоровые лица, принадлежащие к условно младшей возрастной группе от 16 до 30 лет (средний возраст $21,9 \pm 3,7$ лет). В состав второй группы было включено 63 человека, принадлежащие к условно средней возрастной группе без признаков поражения сердечно-сосудистой системы в возрасте от 30 до 45 лет (средний возраст $39,5 \pm 6,2$ лет). В состав третьей

группы были включены 67 больных ИБС: Стабильной стенокардии напряжения I-III ФК (в соответствии с Канадской классификацией, 1985) средний возраст которых составил $54,7 \pm 8,6$ лет. Хроническая коронарная недостаточность была верифицирована у всех больных ИБС методом велоэргометрии или ЧП ЭКС. Кроме того, была выполнена селективная ангиокардиография 29 больным, 9 больным была сделана позитронно-эмиссионная томография сердца с ^{11}C -бутиратом-натрия и 17 больным была выполнена однофотонная эмиссионная томография сердца с ^{99}Tc -технетрилом

Были проведены также дополнительные измерения функциональных показателей включающие анализ стандартных ЭКГ, ультразвуковое исследование сердца, суточное мониторирование ЭКГ и АД, исследование параметров центральной гемодинамики с помощью импедансной реоплетизмографии.

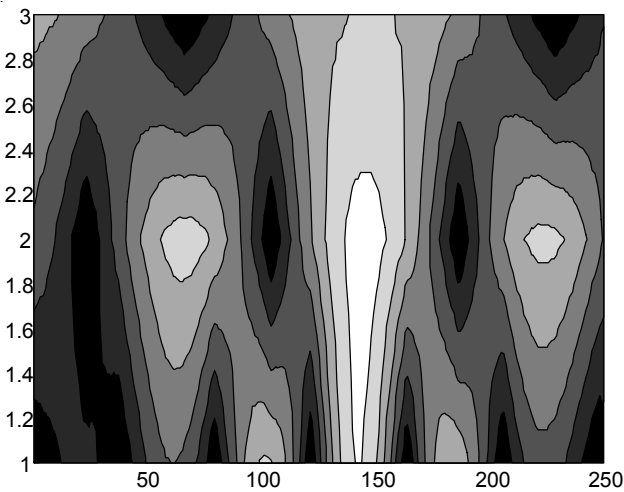


Рис. 1. Пример вейвлет-преобразования комплекса QRS пациента П., 38 лет, группа 2. Из полного кардиоцикла выбрана часть сигнала длиной 250 точек, содержащая комплекс QRS. Полученное спектрально-временное вейвлет-изображение дискретизируется сеткой с 3 уровнями по параметру масштаба (по оси Y) и 16 – по времени (по оси X).

Вейвлет-преобразование производилось с помощью пакета программ “MATLAB 5.2” после полученного с помощью аппаратуры фирмы “Geolink-Elektronics” сигнал-усредненного кардиоцикла по методике, разработанной в лаборатории компьютерных технологий в медицине Факультета фундаментальной медицины МГУ им. М.В. Ломоносова. Нами за основу было выбрано непрерывное вейвлет-преобразование с базисной функцией Морлет [7]. Из полного кардиоцикла, усредненного с синхронизацией по комплексу QRS, выбиралась часть сигнала длиной 250 точек содержащая комплекс QRS. Полученное спектрально-временное вейвлет-изображение для каждого из 3-х ортогональных отведений (X, Y и Z) дискретизировалось с помощью сетки из 48 точек (3 уровня по параметру масштаба и 16 — по времени). Полученные значения, рассматривались либо как три 48-мерных вектора, либо как один 144-мерный

(рис. 1). Преимуществом вейвлет-преобразований является большая математическая корректность процедуры. При каждом значении параметра масштаба базисной функции результат преобразования можно рассматривать как сигнал на выходе узкополосного фильтра со средней частотой полосы пропускания, определяемой параметром масштаба. Фактическая размерность пространства вейвлет-изображений далее была уменьшена за счет отбора наиболее информативных точек.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Была применена процедура пошагового линейного дискриминантного анализа с последовательным включением и исключением признаков, реализованная в программном статистическом пакете STATISTICA. Результатом линейного дискриминантного анализа являлась линейная дискриминантная функция (ДФ). Параллельно производился факторный анализ вейвлетограмм СУ-ЭКГ методом главных компонент с целью выделить наиболее информативные показатели отдельно в каждом из трех ортогональных отведений X, Y, Z и по всем трем отведениям вместе.

Наиболее информативным оказалось X отведение. По полному набору информативных компонент, включающему 48 точек вейвлетограммы, суммарный процент ошибок “экзамена” составил 20,51%, по наиболее информативным 26 точкам — 24,12%. По дискриминантным функциям полного набора показателей X отведения к 1 группе правильно относились 19 человек и неправильно 3 человека из 2 группы и 4 человека из 3 группы. Ко 2 группе правильно относились 50 человек и неправильно 4 человека из 1 группы и 8 человек из 3 группы. К 3 группе обследуемых правильно относились 55 человек и неправильно 3 человека из 1 группы и 10 человек из 2 группы. Результаты дискриминантного “экзамена” приведены в табл. 1.

Менее информативным было Y отведение, где суммарный процент ошибок по всей совокупности показателей составил 23,08% и по наиболее информативным 21 показателю — 25,88%. Ещё менее информативным оказалось Z отведение. По 48 точкам вейвлетограммы, сум-

Таблица 1.

Результаты дискриминантного анализа по полному набору информативных компонент вейвлетограмм для каждого из трех ортогональных отведений.

Группы фактически	Отведения	% ошибок	Отнесено по результатам ДФ к группам		
			1 группа	2 группа	3 группа
1 группа n=26	X	26.32	19	4	3
	Y	38.46	16	8	2
	Z	61.54	10	9	7
2 группа n=63	X	20.63	3	50	10
	Y	15.87	4	53	6
	Z	22.06	4	53	11
3 группа n=67	X	17.91	4	8	55
	Y	23.88	2	14	51
	Z	25.80	4	15	55

Таблица 2.

Результаты дискриминантного анализа по информативным компонентам вейвлетограмм для всех трех ортогональных отведений.

Количество признаков	Группы фактически	% ошибок	Отнесено по результатам ДФ к группам		
			1 группа	2 группа	3 группа
26	1 группа (n=26)	38.46	16	8	2
	2 группа (n=63)	11.11	2	56	5
	3 группа (n=67)	17.91	2	10	55
16	1 группа (n=26)	50.01	13	8	5
	2 группа (n=63)	15.94	6	58	5
	3 группа (n=67)	21.33	3	13	59

марный процент ошибок “экзамена” составил 30,59%, по наиболее информативным 6 точкам — 40,38%.

По полному набору информативных компонент, включающему 26 точек вейвлетограммы для всех трёх отведений, процент ошибок метода составил 18,59%, по наиболее информативным 16 точкам процент ошибок составил 23,53%. По дискриминантным функциям к 1 группе правильно относились 16 человек и неправильно 2 человека из 2 группы и 2 человека из 3 группы; ко 2 группе правильно относились 56 человек и неправильно 8 человек из 1 группы и 10 человек из 3 группы; к 3 группе правильно относились 55 человек и неправильно 2 человек из 1 группы и 5 человек из 2 группы (табл. 2).

На рис. 2 представлена диаграмма распределения групп по дискриминантным функциям. Очевидно, что по первой дискриминантной функции имеется отчетливое различие между группами здоровых лиц и больными ИБС. Однако по второй функции имеется отчетливое

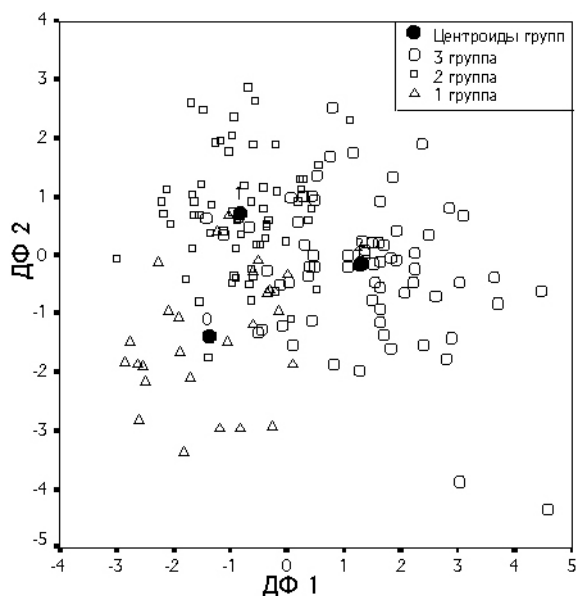


Рис. 2. Диаграмма распределения двух различных возрастных групп здоровых лиц и больных ИБС по результатам дискриминантного анализа. ДФ1 и ДФ2 – первая и вторая дискриминантные функции. 1 группа- здоровые лица младшей возрастной группы, 2 группа- здоровые лица средней возрастной группы и 3 группа- больные ИБС.

различие между двумя возрастными группами здоровых лиц.

На рис. 3 приведены гистограммы значений первой дискриминантной функции, которая определяет значимое различие между здоровыми и больными ИБС, при этом обе группы здоровых лиц были объединены. Видно, что даже объединенная группа здоровых лиц имеет заметно меньшую вариабельность значений дискриминантной функции. Это свидетельствует о большей устойчивости показателя по сравнению с группой больных ИБС.

Таким образом, применение вейвлет-преобразования электрокардиосигнала для диагностики ишемических изменений миокарда по 16 наиболее информативным признакам всех трех ортогональных отведений дает 94,5% чувствительности и 85,1% специфичности метода. Прогностическая ценность положительного результата составляет 77,6%, прогностическая ценность отрицательного результата составляет 96,6%.

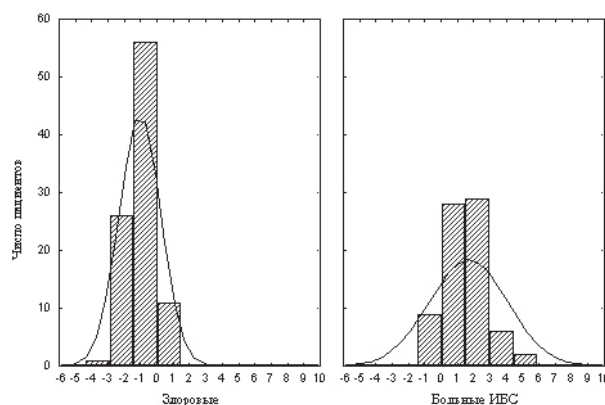


Рис. 3. Гистограмма распределения объединённой группы здоровых лиц и больных ИБС. По оси Y- число пациентов, по оси X- первая дискриминантная функция.

Проблема повторяемости результатов вейвлет-преобразования ЭКГ чрезвычайно велика для оценки общих возможностей данного метода, его чувствительности и специфичности. В литературе отмечено, что использование преобразования Фурье для изучения биологических сигналов приводит к большим различиям в результатах анализа. Существуют и другие работы, в которых высказывается утверждение, что из-за специфики преобразования Фурье точность метода спектрально-временного картирования уступает обычному методу Симсона. Крайне важным было оценить повторяемость результатов в исследуемых группах, для чего из всех трех групп по случайному принципу были отобраны 15 человек (8 здоровых и 7 больных ИБС) которым исследование проводилось дважды в разное время суток с интервалом от 1 до 3 суток. Далее анализировались все описанные выше 48 показателей по каждому из ортогональных отведений. Для оценки повторяемости был применен кластерный анализ, целью которого было оценить сходство между точками вейвлетограммы комплекса QRS одного индивида в разные временные промежутки. Ре-

зультаты кластерного анализа наиболее информативно-го X отведения изображены на диаграмме (рис.4). Если смотреть на нее слева направо, то признаки тем ближе друг к другу, чем раньше линии, им соответствующие, сливаются в одну. В качестве меры близости вейвлет-преобразований комплексов QRS было выбрано евклидово расстояние в 48-мерном пространстве. По наиболее информативному X-отведению было получено среднее расстояние в 15 парах измерений равное 47 условным единицам, в то время как расстояние между всеми остальными возможными парами объектов оказалось равным 385 условным единицам. Этот результат показывает как достаточно хорошую устойчивость вейвлет-преобразований усредненных ЭКГ, так и вполне удовлетворительную повторяемость измерений.

Поскольку в 2-х группах здоровых пациентов наблюдался достаточно большой разброс по возрасту и диск-

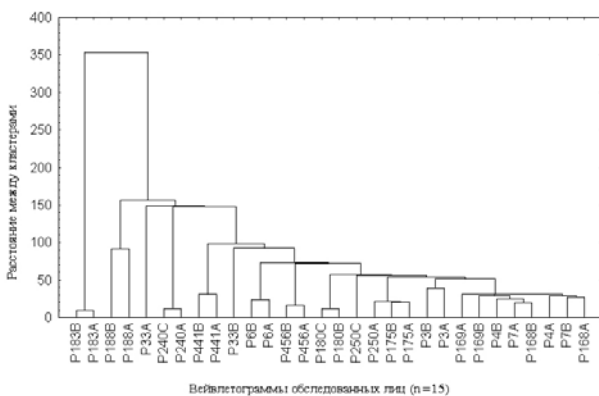


Рис. 4. Кластерный анализ результатов вейвлет-преобразования комплекса QRS случайной выборки лиц по отведению X. По оси Y-расстояние между кластерами, по оси X-результаты вейвлет-преобразования обследуемых лиц случайной выборки в разные промежутки времени.

риминантный анализ позволил различать молодых пациентов и пациентов среднего возраста, была предпринята попытка оценить, какие участки вейвлет-преобразования в наибольшей степени чувствительны к возрасту. Однако, прямое применение линейного регрессионного анализа не показало значимых связей.

Более информативной оказалась связь между возрастом и значениями первой канонической дискриминантной функции, построенной по 26 наиболее информативным точкам вейвлетограммы. Было получено значимое уравнение регрессии $ДФ_1 = 2,45 - 0,055 * t$ (где t-возраст исследуемых). Это уравнение регрессии можно интерпретировать так, что в группе здоровых с возрастом происходит смещение суммарного информативного показателя вейвлетограммы в среднем на 0,1 относительной единицы за каждые 2 года в сторону группы больных ИБС. Однако различие между группами здоровых и группой больных ИБС остается достаточно существенным.

ВЫВОДЫ

1. Применение для диагностики ИБС вейвлет-преобразования комплекса QRS электрокардиограммы по 16 наиболее информативным признакам всех трех ортогональных отведений дает 94,5% чувствительности и 85,1% специфичности метода. Прогностическая ценность положительного результата составляет 77,6%, прогностическая ценность отрицательного результата составляет 96,6%.
2. Метод вейвлет-преобразования комплекса QRS имеет достаточно высокую устойчивость и повторяемость индивидуальных характеристик обследованных лиц.
3. Возрастные характеристики не оказывают достоверного влияния на различие между группами здоровых и больных ИБС, однако в группах здоровых лиц имеют регрессионную зависимость смещения дискриминантной функции в среднем на 0,1 относительной единицы за каждые 2 года в сторону группы больных ИБС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blaszyk K., Kulakowski P., Poloniecki J., Odemuyiwa O., Camma J., Malik M. Spectral temporal mapping versus time domain-analysis of the signal averaged electrocardiogram: reproducibility of results. // European Heart Journal, 1992-Vol. 13., Abstract suppl., P.646.
2. Buckingham T.A., Thessen C., Hertweck D. et al. Signal-averaged electrocardiograms in the time and frequency domains. // American Journal of Cardiology, 1989-Vol. 63., P.820-825.
3. Crowe J.A., Gibson N.M., Woolfson M.S., Somekh M.G. Wavelet transform as a potential tool for ECG analysis and compression. // Journal of the Biomedical Engineering, May-1992, Vol. 14(3), P.268-272.
4. Gyaw T.A., Ray. S. R. The wavelet transform as a tool for recognition of biosignals. // Biomedical Scientific Instruments, 1994-Vol. 30., P.63-68.
5. Haberl R., Jige G., Pulter R., Steinbeck G. Spectral mapping of the electrocardiogram with Fourier transforms for identification of patients with sustained ventricular tachycardia and coronary artery disease. // European Heart Journal, 1989-Vol.10., P.316-322.
6. 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 Biomedical Engineering, Vol. 41, N 7, July- 1994, P.625-633.
7. Morlet D., Couderc J.P., Touboul P., Rubel P., Wavelet analysis of high-resolution ECGs in post-infarction patients: role of the basic wavelet and of the analyzed lead. // International Journal Biomedicine Computing, Jun- 1995, Vol. 39(3), P.311-325/
8. Simson M.B., Euler D., Michelson E.L. Detection of delayed ventricular activation on the body surface in dogs. // American Journal of Physiology, 1981-Vol.241., P.363-369.
9. Simson M.B. Use of signal in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction. // Circulation, 1981-Vol 64., P.235-242.

АНАЛИЗ СИГНАЛ-УСРЕДНЕННОЙ ЭКГ (ПО ДАННЫМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ) У ЗДОРОВЫХ И БОЛЬНЫХ ИБС.

С.А.Бойцов, С.Л.Гришаев, В.Н.Солнцев, Ю.С.Кудрявцев

Изучены возможности использования вейвлет-преобразования (Wavelet-transform) комплекса QRS кардиосигнала полученного при регистрации сигнал-усредненной ЭКГ высокого разрешения (ЭКГ-ВР) для диагностики ИБС. Нами обследовано 156 человек. Все испытуемые были разделены на 3 группы. Первую группу составили здоровые лица условно младшей возрастной категории от 16 до 30 лет (n=26). Во вторую группу вошли лица условно средней возрастной категории от 31 до 45 лет без признаков поражения сердечно-сосудистой системы (n=63). В состав третьей группы были включены больные ИБС: стенокардией напряжения I-III ФК (n=67). Диагноз ИБС был верифицирован при помощи нагрузочных проб (велоэргометрии или чреспищеводной электрокардиостимуляцией - ЧПЭКС), части больных выполнялась селективная коронарография, радиоизотопные методы исследования сердца. Вейвлет-преобразование сигнал- усредненного кардицикла проводилось на основе программного пакета "MATLAB 5.2", за основу было выбрано непрерывное вейвлет-преобразование с базисной функцией Морлет. К полученным вейвлетограммам была применена процедура пошагового линейного дискриминантного анализа, параллельно производился факторный анализ для выявления наиболее информативных показателей вейвлетограмм. Кроме того оценивалась повторяемость результатов в исследуемых группах. Чувствительность метода составила 94,5%, специфичность 85,1%. Прогностическая ценность положительного результата составила 77,6%, отрицательного – 96,6%. Метод имеет достаточную устойчивость и повторяемость результатов.

ANALYSIS OF SIGNAL-AVERAGED ECG (BY THE DATA OF WAVELET-TRANSFORMATION) IN HEALTHY PERSONS AND PATIENTS WITH CORONARY ARTERY DISEASE

S.A.Boitsov, S.L.Grishaev, V.N.Solntsev, Yu.S.Kudryavtsev

The potentialities of use of the wavelet-transformation of the electrocardiogram QRS-complex obtained in the course of recording of the signal-averaged high-resolution ECG for the coronary artery disease diagnostics were studied. One hundred fifty six patients were examined. Three following patient groups were investigated: the healthy young adults with the age of 16-30 years, the first group (n=26); the persons of the age of 31-45 years without signs of the cardiovascular diseases, the second group (n=63); and, the patients with coronary artery disease (I-III functional class exertional angina), the third group (n=67). The coronary artery disease was verified with the aid of stress tests (bicycle test and transesophageal pacing), in some patients, the selective coronary angiography and radioisotope tests were performed. The wavelet-transformation of signal-averaged cardiocycle was made using the software program MATLAB 5.2, the continuous wavelet-transformation with Morlette basal function selected as a base. The waveletograms obtained were undergone the stepwise linear discriminant analysis and, simultaneously, the factor analysis to reveal the most informative indices of waveletogram. Besides, the reproducibility of the data in the groups investigated was evaluated. The technique sensitivity was 94.5%, its specificity, 85.1%. The positive predictive value of result was 77.6%, the negative one was 96.6%. The technique has a sufficient stability and reproducibility of the results.