



ВЕЙВЛЕТНЫЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

*Я.А. Туровский, В.В. Мишин, Л.А. Битюцкая,
Е.В. Киселева, В.Н. Яковлев, И.Н. Проскурин*

На основе вейвлетного анализа предложен метод выделения особенностей вегетативной регуляции вариабельности сердечного ритма человека. Проведена оценка количества контуров регуляции вариабельности сердечного ритма. Показаны типологические реакции вариабельности сердечного ритма на различные типы экзогенных влияний в различных возрастных группах. Выдвинуто предположение о связи характеристик «всплесков вейвлетной плотности мощности» с характером адаптации плода к внутриутробной гипоксии.

Введение

Методы спектрального анализа широко используются в изучении динамических реакций целого ряда систем и органов человека на изменяющиеся факторы окружающей среды. Примерами реакций адаптации могут служить изменение электрической активности мозга, скорость и протекание биохимических процессов, реакции сердечно-сосудистой системы. В частности, вариабельность (изменчивость) сердечного ритма, отражающая степень напряженности адаптивных реакций организма [1,2]. Стандартные методики, используемые в современной медицинской практике [2] для задач анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР), не позволяют оценить временную динамику процесса. Они, как правило, основаны на предположении о стационарном характере реакций вегетативного гомеостаза. Для исследования временной структуры сигнала необходимо применение методов, позволяющих отследить эволюцию функционально значимых частотных компонентов исследуемого сигнала. Вейвлетный анализ [3,4], широко используемый в последнее время в различных областях, позволяет провести такую оценку.

Так в работе Stefanovska A. et al. [5] с помощью вейвлетного анализа был определен частотный диапазон показателей микроциркуляции, соответствующий эндотелиальной активности; Joho S. et al. [6] вейвлетный анализ применили для выявления активации симпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС) в ответ на ишемию миокарда; Kadambe S. et al. [7] использовали диадическое вейвлет-преобразование для определения комплекса QRS на ЭКГ.

Целью нашей работы являлась оценка взаимовлияния физиологически значимых частотных диапазонов рядов ВСП с помощью вейвлетного анализа.

1. Объекты и методы

Для выработки общих принципов вейвлетного анализа кардиоинтервалограмм были выбраны группы испытуемых в разные периоды онтогенеза, для каждого из которых характерны свои особенности механизмов регуляции ВСП [8, 9].

Группа 1: 53 плода со сроком гестации 36-40 недель. Исследовались временные ряды, полученные методом антенатальной кардиоотографии (тахограммы) - зависимость частоты сердечных сокращений (ЧСС) плода от времени.

Группа 2: 30 детей без патологии сердечно-сосудистой системы в возрасте 6-13 лет. Исследовались RR-интервалограммы - регистрация времени между двумя соседними зубцами R на ЭКГ.

Группа 3: 60 студентов в возрасте 17-25 лет. Рассматривались RR-интервалограммы.

Перед проведением вейвлетного анализа из сигнала вычитался постоянный тренд. Для исследования временной структуры ВСП использовалось непрерывное вейвлетное преобразование [3]

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi[(t-b)/a]dt, \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad a > 0. \quad (1)$$

Здесь a - масштаб вейвлетного преобразования; b - время, отсчеты исследуемого ряда; \mathbb{R} - множество целых чисел. В качестве анализирующей функции использовалась базисная функция вейвлета Morlet [10]

$$\psi_0 = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-\eta^2/2}, \quad (2)$$

На рис. 1 представлена антенатальная тахограмма и её вейвлетная диаграмма. Гестационный срок плода 35 недель, состояние умеренной внутриутробной гипоксии. Наличие древовидной структуры локальных экстремумов свидетельствует о самоподобии исследуемого процесса, что, в конечном итоге, отражает существование иерархии механизмов регуляции.

На основе матрицы вейвлетных коэффициентов строились скейлограммы, заданные как среднее квадратов вейвлетных коэффициентов $W(a,b)$ на заданном масштабе a

$$V(a) = a/N \sum_{b=1}^N (W(a,b))^2. \quad (3)$$

Являясь функцией масштаба, скейлограмма отражает ту же информацию, что и спектральная плотность мощности Фурье, являющаяся функцией от частоты. По аналогии со спектральной плотностью мощности спектра Фурье введем понятие вейвлетной плотности мощности (ВПМ). Как известно, вейвлет-преобразование имеет преимущество перед преобразованием Фурье прежде всего за счет свойства локальности у вейвлетов. Вейвлетное преобразование, представляющее как бы временную развертку спектра, позволяет получить и более локализованную во времени энергетическую информацию. Энергетические диаграммы (скейлограммы) строились на кратковременных (примерно 2-3 секунды) отрезках, что позволило отслеживать динамику процесса. На скейло-граммах выделялись физиологически значимые частотные диапазоны, ответственные за различные типы механизмов регуляции. При анализе кардиоотограмм (*группа 1*)

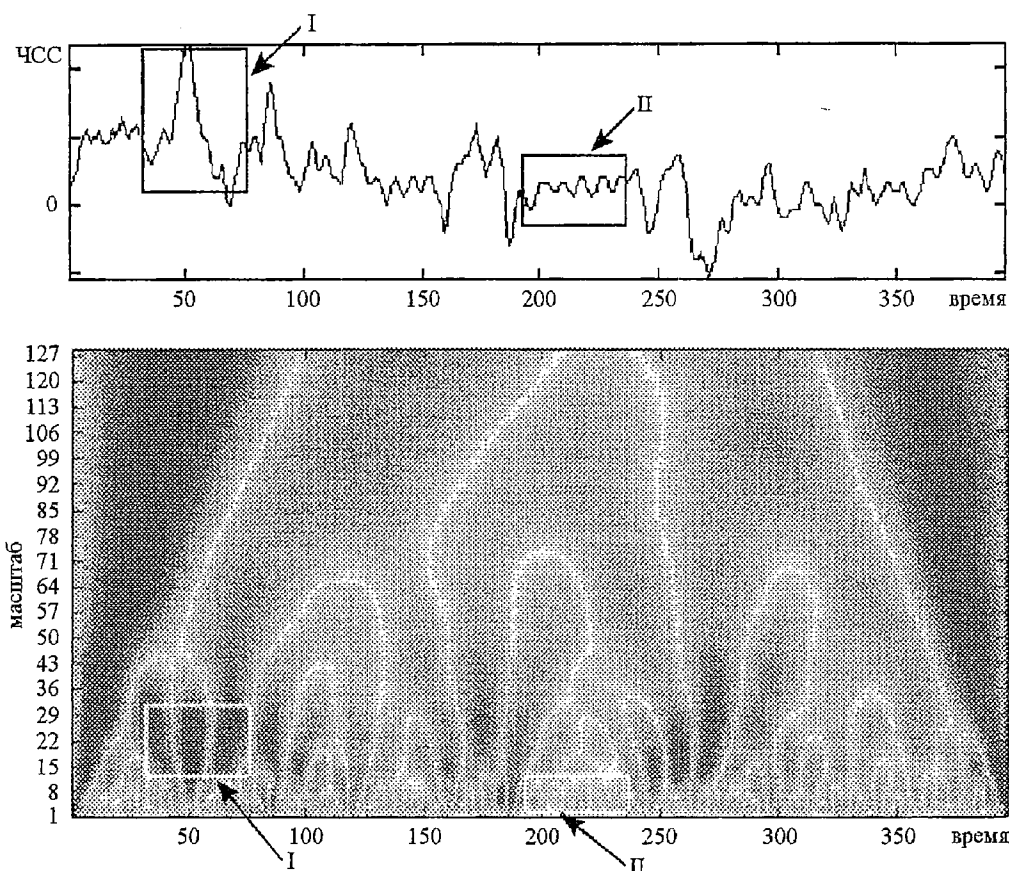


Рис. 1. *a* - Антенатальная тахограмма плода и *б* - ее вейвлетная диаграмма (анализирующая функция - вейвлет Morlet). Фрагмент I соответствует акцелерации; фрагмент II соответствует базальному ритму; темные участки соответствуют максимальным значениям вейвлетных коэффициентов

рассматривались два частотных диапазона: 0.0025-0.005 Гц, что соответствует акцелерациям (медленноволновым, высокоамплитудным колебаниям); 0.005-0.07 Гц (высокочастотная область базального ритма) (рис. 1). На RR-интервалограммах (группы 2 и 3) выделялись следующие частотные диапазоны: выше 0.15 Гц - HF-диапазон влияния парасимпатического отдела ВНС; 0.15-0.05 Гц - LF-диапазон влияния симпатического отдела ВНС.

Алгоритм построения «локального вейвлетного спектра» представлен на рис. 2. В каждом из диапазонов определялось суммарное значение ВПМ

$$U = \sum_{a_1}^{a_2} V(a). \quad (4)$$

Интегральная величина U , рассчитанная для каждого из физиологически значимых диапазонов, характеризует динамику влияния симпатического, или парасимпатического, отдела ВНС на ВСП (рис. 3).

Для определения характера взаимовлияния физиологически значимых частотных диапазонов в низкочастотной составляющей сигнала (для RR-интервалограмм - LF, для тахограмм - диапазон акцелераций) выделялись нестационарные элементы (области существенного кратковременного увеличения значений интегральной величины U). В высокочастотной составляющей исследуемого временного ряда (для RR-интервалограмм - HF, для тахограмм - диапазон базального ритма) анализировались удельные значения U как на временных отрезках, соответствующих нестационарным элементам, так и вне их.

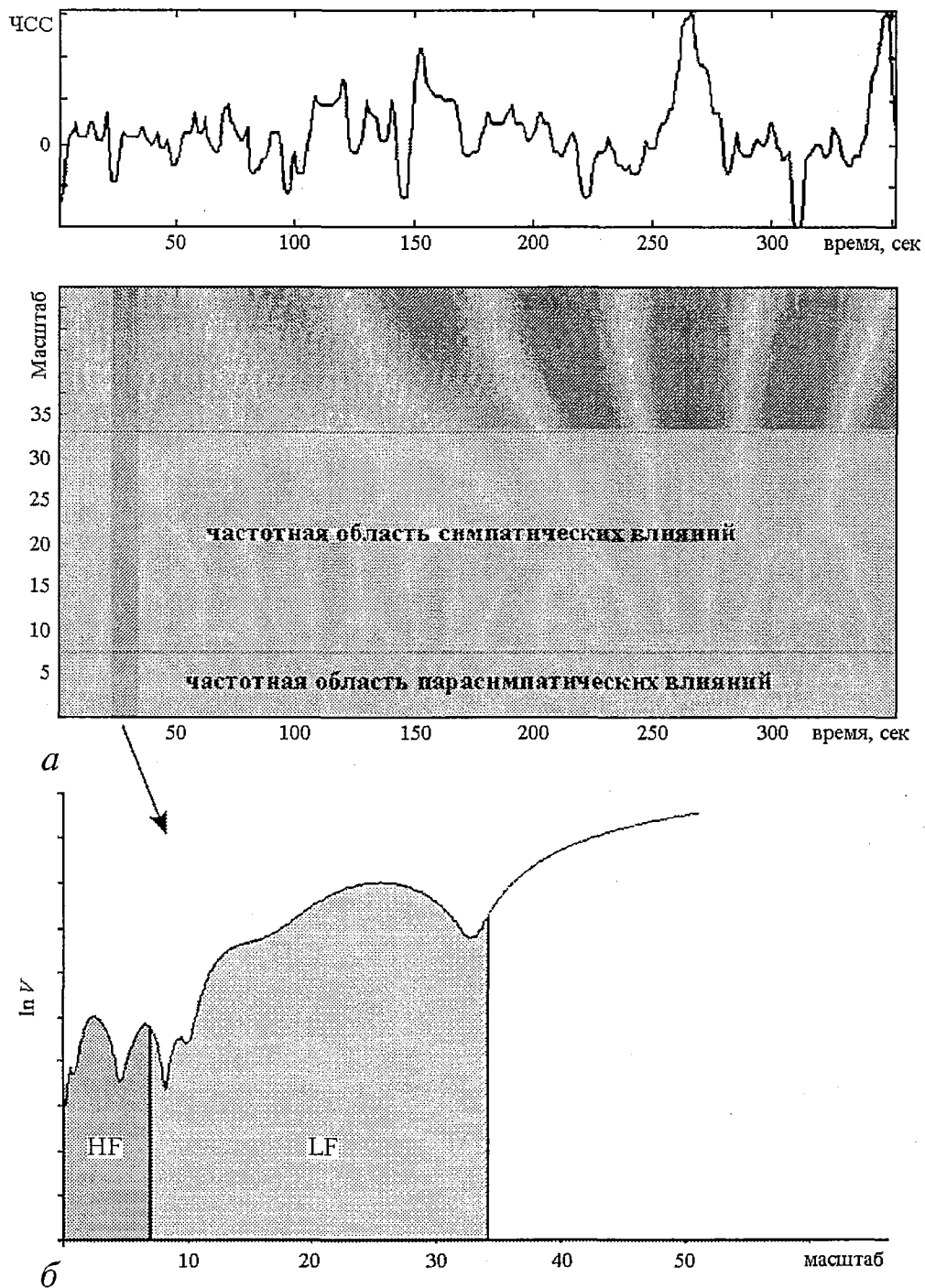


Рис. 2. Частотно-временной анализ variability сердечного ритма взрослого человека: *а* - исходная кардиоинтервалограмма и вейвлетная диаграмма с выделенными физиологически значимыми частотными диапазонами; *б* - локальный вейвлетный спектр

Наличие значимых различий между отнесенными ко времени значениями U на исследуемых временных участках свидетельствует о взаимовлиянии между группами нервных центров симпатического и парасимпатического отдела ВНС (рис. 3).

На каждой из построенных скейлограмм (локальных спектров) определялось наличие и положение экстремумов [11]. Максимумы (аналогично пикам

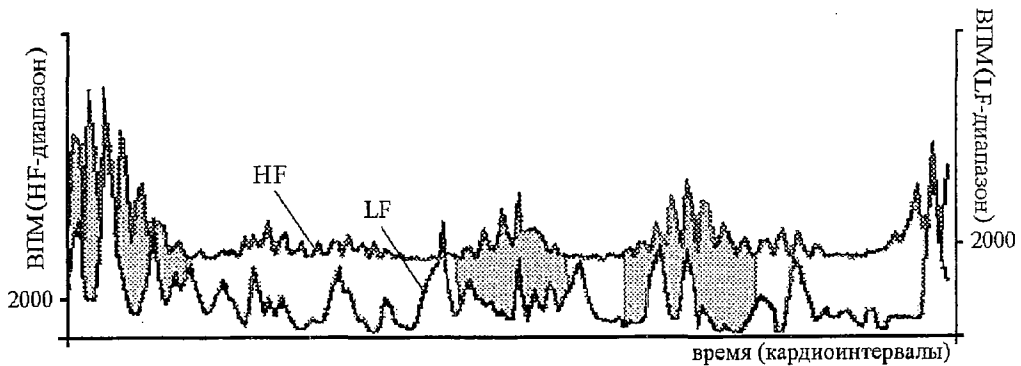


Рис. 3. Типичная зависимость вейвлетной плотности мощности от времени в физиологически значимых диапазонах variability сердечного ритма взрослого человека. В выделенных участках выявлено синхронное изменение удельной вейвлетной плотности мощности, свидетельствующее о взаимовлиянии диапазонов

спектра Фурье) соответствуют наиболее выраженным частотным компонентам. Количество доминирующих частот можно связать с числом контуров регуляции, формирующих картину ВСР. Оценивалось изменение числа максимумов в физиологически значимых частотных диапазонах в различных функциональных состояниях. Это позволило оценить структуру контуров регуляции и сделать на ее основе вывод об изменении функционального состояния.

2. Результаты и обсуждение

Описанная методика анализа локальных вейвлетных спектров позволила при оценке ВСР выявить новую информацию о характере и деталях протекания реакций адаптации организма, что недоступно при использовании принятых в медицине подходов к анализу ВСР.

При исследовании ВСР плода (*группа 1*) в отечественной клинической практике наиболее распространенным критерием оценки является так называемый показатель состояния плода (ПСП), предложенный Демидовым (1983),

$$\text{ПСП} = 0.0155 \Sigma_i \text{CP} + 0.000008 \Sigma_i \text{MA}_2 - 0.064 \Sigma_i \text{MA} + 0.33 \text{CP} / \max \text{MA} + 0.95,$$

где $\Sigma_i \text{CP}$ - общая продолжительность базального ритма в % от времени регистрации; $\Sigma_i \text{MA}$ - общая амплитуда медленных акцелераций (уд./мин); $\text{CP} / \max \text{MA}$ - отношение максимального отрезка стабильного ритма в % от времени регистрации к максимальной амплитуде медленной акцелерации.

Очевидно, что данный показатель носит скорее оценочный характер и не учитывает динамику частотных компонентов сигнала, что сказывается на точности и, в конечном итоге, на прогностической ценности метода. В результате исследования тахограмм плода методом оценки локальных вейвлетных спектров установлена связь изменения ВПМ нестационарных участков в диапазоне базального ритма с увеличением степени гипоксии (кислородной недостаточности) плода. При анализе количества центров регуляции по каждому из диапазонов установлено, что наибольший вклад в суммарное количество центров вносят центры, расположенные в частотной области базального ритма. Установлено соотношение ПСП со значениями ВПМ в области больших масштабов

$$\text{ПСП} \approx e^{-\lg V(a_{\text{end}})}, \quad (5)$$

где $V(a_{\text{end}})$ - значение ВПМ на максимальном масштабе. Кроме того, в области

акцелераций установлено изменение структуры базального ритма, что отражает взаимосвязь исследуемых диапазонов. На основании полученных данных возможно проведение более точной диагностики патологических состояний.

При анализе кардиоинтервалограмм здоровых детей (*группа 2*) установлено, что при проведении дыхательной пробы (пробы Штанге) наблюдается транзиторное уменьшение количества контуров регуляции в частотной области парасимпатических влияний. Количество контуров регуляции в частотной области симпатических влияний также значительно уменьшалось и сохранялось на низком уровне до конца регистрации. Уменьшение количества контуров регуляции происходило на фоне увеличения значений ВПМ во всех исследуемых диапазонах. Существующие традиционные методы оценки ВСП не позволяют получить подобную информацию. Для детального объяснения подобного эффекта нами проводятся дополнительные исследования.

Исследование ВСП студентов (*группа 3*) позволило определить типологические особенности влияния различных отделов вегетативной нервной системы на варибельность сердечного ритма в покое. Установлено, что в HF-диапазоне в состоянии относительного покоя наиболее выражены нестационарные элементы ВПМ у людей с преобладанием тонуса парасимпатического отдела ВНС - ваготоников. Наименее выражены нестационарные элементы ВСП в случае вегетативного равновесия, то есть у нормотоников. Гипотезой, объясняющей это наблюдение, может служить факт взаимного подавления нестационарных компонентов ВСП при нормотонии.

Появилась возможность определить типичные реакции ВНС на переходной процесс и развитие этих изменений во времени. Так, для одной из подгрупп испытуемых характерно значительное увеличение U в LF-диапазоне (соответствует тону симпатического отдела ВНС) в течение всего времени проведения дыхательной пробы. После выдоха значения U за относительно короткий промежуток времени возвращаются на исходный уровень. Значения U в HF-диапазоне (тонус парасимпатического отдела ВНС) увеличиваются к моменту выдоха (рис. 4). Другой тип реагирования характеризуется двумя пиками U на вдохе и выдохе в диапазоне парасимпатических влияний, между которыми наблюдается стабильный участок. Симпатические влияния в ходе дыхательной

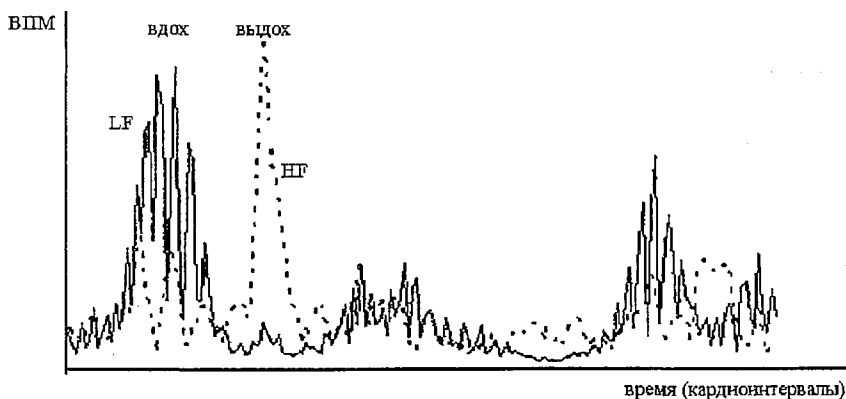


Рис. 4. Динамика вейвлетной плотности мощности варибельности сердечного ритма взрослого человека для HF- и LF-диапазонов при проведении дыхательной пробы (переходный процесс). На высоте вдоха наблюдается значительное увеличение значений ВПМ в LF-диапазоне, свидетельствующее об активности симпатического отдела ВНС; при выдохе наблюдается увеличение значений ВПМ в HF-диапазоне, свидетельствующее об активности парасимпатического отдела ВНС

пробы при этом типе реагирования выражены значительно слабее. Подобные различия типов реагирования объясняются разным исходным тонусом ВНС.

Заключение

Таким образом, использование методики анализа локальных вейвлетных спектров позволяет выявлять особенности variability сердечного ритма, в различных возрастных группах и функциональных состояниях. Выявлено, что на основе оценки динамики вейвлетной плотности мощности можно судить об изменениях функционального состояния вегетативной нервной системы и организма в целом. Показано, что оценка локальных вейвлетных спектров позволяет охарактеризовать типологию переходных процессов variability сердечного ритма и описать их динамику. Установлено существование не описанного ранее в литературе эффекта взаимодействия контуров регуляции симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы. Выявленный эффект позволяет более детально исследовать процесс взаимодействия различных отделов вегетативной нервной системы в ходе адаптации организма к различным экзогенным влияниям. Описана динамика количества контуров регуляции в физиологически значимых диапазонах в антенатальном периоде и при проведении функциональных проб у взрослого человека и ребенка.

Предложенная методика может быть использована для создания новых диагностических критериев, разработка которых невозможна с использованием стандартных статистических методов обработки кардиоинтервалограмм.

Библиографический список

1. Баевский Р.М., Кирилов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменения сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. 222 с.
2. Рябькина Г.В., Соболев А.В. Анализ variability сердечного ритма // Кардиология. 1996. №10. С. 8797.
3. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: спектральный анализ локальных возмущений (основы теории и примеры применения) // Изв. вузов. ПНД. 1996. Т. 4, №2.
4. Daubechies I. Ten lectures on wavelets // CBMS-NSF. Regional conference series in applied mathematics. SIAM, 1992.
5. Stefanovska A., Bracic M., Kvernmo H. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1999. Oct., 46:10. 1230-9.
6. Joho S., Asanoi H., Remah H.A., Igawa A., Kameyama T., Nozawa T., Umeno K., Inoue H. Time-varying spectral analysis of heart rate and left ventricular pressure variability during balloon coronary occlusion in humans: a sympathoexcitatory response to myocardial ischemia // J. Am. Coll. Cardiol. 1999. Dec., 34:7. 1924-31.
7. Kadambe S., Murray R., Boudreaux Bartels G. Wavelet transform-based QRS complex detector // IEEE Trans. Biomed. Eng. 1999. Jul., 46:7. 838-48.
8. Туровский Я.А., Битюцкая Л.А., Яковлев В.Н. и др. Оценка variability сердечного ритма при проведении функциональной пробы // Материалы X международного симпозиума «Эколого-физиологические проблемы адаптации». Москва, 2001. С. 170.
9. Туровский Я.А., Дорохов Е.В., Яковлев В.Н. и др. Локализованный спектральный анализ в оценке variability сердечного ритма студентов при проведении функциональной пробы // Там же. С. 171.

10. *Torrence G., Compo G.P.* // Bull. of Amer. Meteor. Society. 1998. Vol. 79, № 1, January. P. 63.

11. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Об эффективном анализе перехода к хаосу через перемежаемость с помощью вейвлетного преобразования // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 1. С. 3.

*Воронежский государственный
университет*

Поступила в редакцию 28.02.02

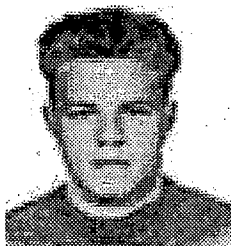
WAVELET ANALYSIS OF HEARTBEAT RATE VARIABILITY

*Y.A. Turovsky, V.V. Mishin, L.A. Bitutskaya, E.V. Kiseleva,
V.N. Yakovlev, I.N. Proskurin*

Based on continuous wavelet transforms the new method of heartbeat rate variability analysis was proposed. Wavelet analysis proved useful for allocating features in heartbeat rate regulation and for estimating the number of regulative contours for heartbeat rate variability series. There were revealed some typical heartbeat rate reactions at different age groups to various types of external influence. It is shown that «wavelet power spectrum» is a powerful tool not only for the fetus state diagnostics but for general description of heartbeat rate dynamics in transient processes.



Туровский Ярослав Александрович - родился в 1978 году, окончил Воронежскую государственную медицинскую академию (2001). В настоящее время аспирант на кафедре нормальной физиологии. Сфера научных интересов: клиническая физиология.



Мишин Владимир Владимирович - родился в 1976 году в Воронеже, окончил Воронежский государственный университет (1999). После окончания ВГУ - аспирант на кафедре физики полупроводников и микроэлектроники.

Битюцкая Лариса Александровна - к.х.н., доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники Воронежского государственного университета.

Киселева Елена Владимировна - к.м.н., ассистент кафедры акушерства и гинекологии №2 Воронежской государственной медицинской академии. Сфера интересов - новые методы диагностики и лечения акушерской патологии.

Яковлев Виктор Николаевич - д.м.н., профессор, заведующий кафедрой нормальной физиологии Воронежской государственной медицинской академии. Сфера интересов - гипербарическая оксигенация, клиническая физиология.

Проскурин Илья Николаевич - студент второго курса факультета прикладной математики и механики Воронежского государственного университета.