

УДК 621.396

О.Г. Киселева, Е.А. Настенко, д-р биол. наук

Разработка компьютерной системы суточного анализа нелинейных динамических свойств сердечного ритма

Целью данной работы является разработка системы оценивания variability сердечного ритма с использованием методов нелинейной динамики. А именно, в работе было разработан подход и программная реализация алгоритмов количественной и качественной оценки регулярности циркадного ритма, используя алгоритмический подход Колмогорова, уравнения Пуанкаре, аппроксимационную энтропию, фликкершум, гистограмму распределения, график Лоренца. Интерпретация результатов работы программы позволяет формулировать диагностические признаки состояния здоровья человека на основе оценки регулярности суточного сердечного ритма.

The main goal of this article is development of a system for the heart rate variability analysis on the base of non-linear dynamic methods. To achieve this goal the key algorithm for qualitative and quantified estimation of 24-hours heart rate regularity was developed. A software was developed where the Kolmogorov algorithm, Poincare equation, approximate entropy, flicker noise, distribution bar chart, Lorenz diagram were used. The results of calculation can be used for defining of diagnostic signs of human health state on the base of daily heart rate regularity estimation.

Введение

Статистика проявления различных нарушений в работе сердечно-сосудистой системы (ССС) организма человека в последнее время существенно увеличивается.

Одним из основных показателей работы сердца, характеризующих состояние ССС, является сердечный ритм (СР), т.е. количество сокращений («ударов») сердца в минуту. В норме, сердце совершает от 60 до 80 сокращений в минуту, когда взрослый человек находится в состоянии покоя, кроме того, частота сокращений сердца может возрастать до 200 ударов в минуту при физической нагрузке, в момент стресса или возбуждения.

Однако, нарушения этих показателей сердечного ритма повседневно встречаются во врачебной практике. Эти нарушения спровоцированы нарушениями работы вегетативной нервной

системы (ВНС). ВНС - отдел нервной системы, регулирующий функциональный уровень внутренней жизни организма, необходимый для адекватной реакции всех его систем. Вегетативная нервная система подразделяется на симпатическую (характеризуется состоянием возбуждения) и парасимпатическую (характеризуется состоянием покоя). Поэтому, для оценки функционального уровня жизни организма необходимо как минимум суточное наблюдение за ним. А именно, анализ состояния равновесия симпатического и парасимпатического отделов ВНС человека в течении суток или более. Характеристику поведения того или иного отдела ВНС можно получить, оценив сложность и variability колебаний суточного сердечного ритма.

Автоматическая диагностика нарушений ритма сердечной деятельности является традиционной задачей медицинской кибернетики. К настоящему времени в этой области накоплен значительный опыт. Решение задач базируется как на врачебном опыте, так и на статистической обработке данных. Суточный сердечный ритм (ССР) получают с помощью проведения Холтеровского мониторирования. Холтеровское мониторирование - это запись обычной электрокардиограммы (ЭКГ) больного в течение суток или более (до 72 часов), когда он ведет привычную физическую активность.

При анализе регуляторных резервов организма человека необходимо разделение ЭКГ на классы по некоторым качественным признакам, описывающим состояние человека. Для метода количественной оценки регулярности циркадного (суточного) сердечного ритма разработаны алгоритмы и программы, использующие алгоритмический подход Колмогорова [1, 2] и уравнения Пуанкаре [1]. Взаимосвязь полученных оценок регулярности с состоянием организма позволяет сформулировать диагностические признаки.

Основная часть

В работе было разработано программное обеспечение методов анализа суточного мониторинга сердечного ритма.

Выделение регулярностей суточного сердечного ритма

В алгоритме оценки регулярности сердечного ритма на основе алгоритмического подхода Кол-

могорова вычисляется количество информации (энтропия) дискретного ЭКГ сигнала на различных интервалах суточных измерений. Отличия в уровне энтропии количественно характеризуют вариабельность сигнала. Кроме того, количественно оценивается уровень алгоритмической сложности [3-5] вариаций сердечного ритма в ходе Холтеровского мониторирования. От исходной ритмограммы можно перейти к т.н. «обедненной» шкале, перекодировав («заглубив») данные в диапазоне $[x_{\min}; x_{\max}]$ с шагом $0,10\sigma$, что примерно соответствует погрешности медицинской измерительной (около 3%...5%).

По заглубленной (с шагом $0,10\sigma$) последовательности, а также по полученной из нее разностной последовательности, строится словарь регулярностей – повторяющихся последовательностей кардиоциклов (Рис. 1), по которой

оцениваются частота повторений и вид анализируемых регулярностей (паттерны), а также время суток, когда они встречаются.

Анализ нелинейной динамики поведения организма человека

Помимо общепринятых функций мониторинга в программе реализованы функции, характеризующие нелинейную динамику системы: аппроксимационная энтропия [10 - 14] и фрактальная размерность (Рис. 2).

Фрактальная размерность является характеристикой детерминистического хаоса и показывает приближение процесса к детерминированному (исчерпание регуляторных резервов), либо к стохастическому (повреждение структурных элементов или связей системы) режиму функционирования.

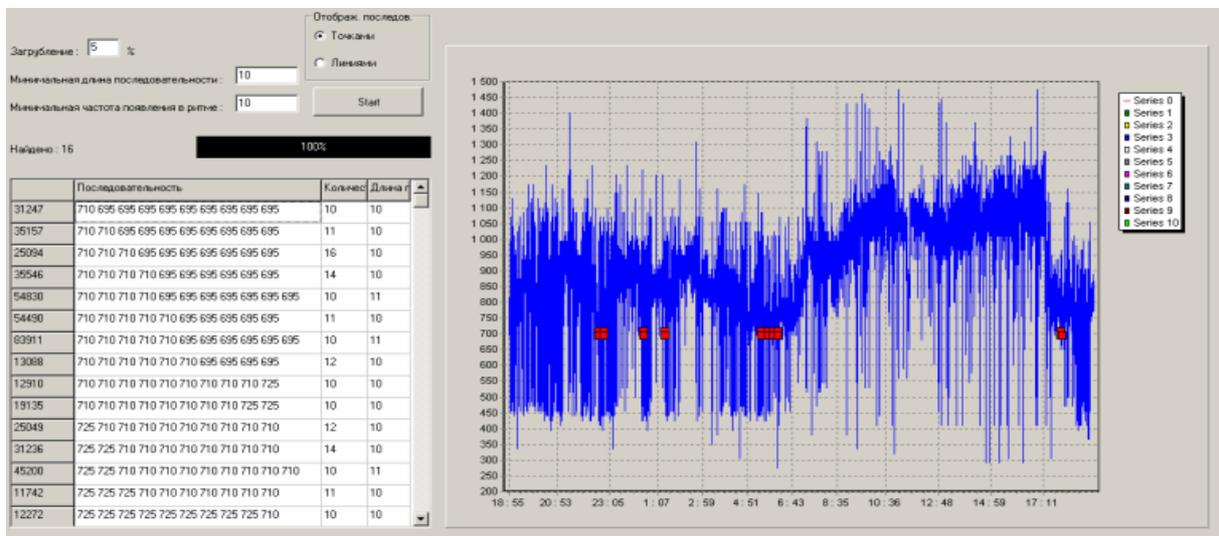


Рис. 1. Входная последовательность временных задержек сердечного ритма (по оси абсцисс отложено время проведения измерения, по оси ординат – значение RR)

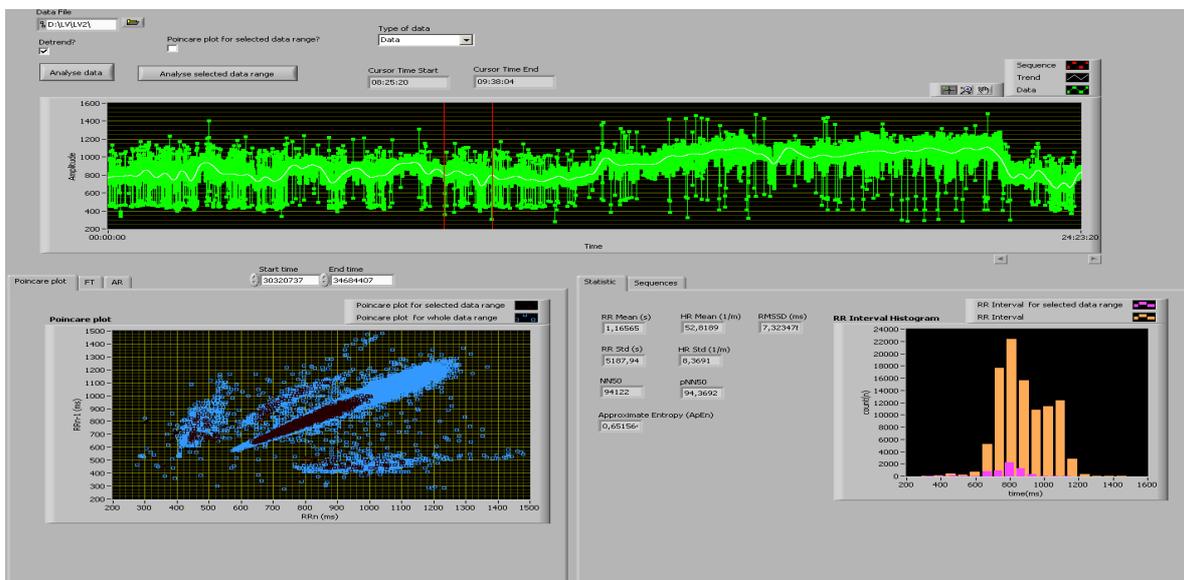


Рис. 2. Результаты работы программы

Аппроксимационная энтропия [8, 9] является количественной оценкой повторяемости фрагментов числовой последовательности независимо от частотного диапазона. Резкое снижение показателя аппроксимационной энтропии, особенно в сочетании со снижением вариабельности числовой последовательности, является достаточным признаком снижения регуляторной избыточности организма и может рассматриваться как признак возрастания вероятности наступления внезапной сердечной смерти. Такие ситуации являются часто наблюдаемыми в отделениях кардиореанимации у больных с высокой тяжестью состояния (например, острый инфаркт миокарда (ИМ), несколько перенесённых ИМ в анамнезе и т.п.).

Достоинством оценки поведения ВНС на основе аппроксимационной энтропии является её применимость для обработки последовательностей кардиоинтервалов относительно небольшой длины. Например, минуты и десятки минут.

Фрактальная размерность [3] обладает примерно теми же свойствами, что и аппроксимационная энтропия, однако требует большой длины числовой последовательности, что снижает её чувствительность к наступлению внезапных событий. Фрактальная размерность может быть достаточно удобной интегральной оценкой состояния организма на всём интервале времени мониторинга, или отдельных, достаточно больших его частей (например, сон, отдых, период бодрствования и нагрузка).

Методы количественной оценки состояния сердечного ритма

Развитием концепции анализа регуляторных резервов организма человека служит применение инструментов, позволяющих количественно оценивать текущее состояние анализируемого объекта или процесса, но так, чтобы упорядочение этих оценок приводило бы к соответствующему упорядочению исследуемого свойства.

Для количественной оценки циркадного ритма в программе был реализован метод оценки фликкер-шума исследуемой ритмограммы [6].

Фликкер-шум (шум $1/f$) – это флуктуационный процесс, спектральная плотность которого $S(f)$ при низких частотах растёт с понижением частоты по закону, близкому $k1/f$, в котором показатель g близок к 1. Шум $1/f$ обусловлен суперпозицией процессов с различными временами релаксации и может быть эффективным показателем медленных, низкоамплитудных, переходных патологических процессов. Резкое повышение плотности спектра мощности (обычно в диапазоне 0,004...0,04 Гц) [6] в сверхнизкочастотном диапазоне может быть критерием го-

товности системы к катастрофическому поведению (внезапная асистолия, фибрилляция желудочков, пароксизмальная аритмия различного вида). Указанная ситуация может быть наиболее вероятной, если на интервале мониторинга наблюдались участки высоковариативного поведения (колебания ритма сердца высокой сложности и/или высокой вариации величины кардиоинтервалов). Последняя ситуация может быть легко идентифицируема с помощью графика Лоренца.

Методы качественной оценки состояния сердечного ритма

К алгоритмам качественной оценки степени равновесия состояния организма человека можно отнести реализованный в программе алгоритм построения траектории изменения сердечного ритма на псевдофазовой плоскости, т.н. график Лоренца, которая является наиболее актуальной при рассмотрении фрагментов ритмо- или интервалограммы в скользящем окне небольшой длины. Иными словами, суммирование низкочастотных и высокочастотных реакций системы является прогностическим неблагоприятным признаком катастрофических событий.

Разработанная в работе программа позволяет строить график Лоренца по всей кардиоинтервалограмме с наложением на него графика по отдельной части интервалограммы (Рис. 3).

Кроме того, в программе было реализовано построение гистограммы распределения элементов числовой последовательности, которое допускает одновременное выведение как общей гистограммы, так и отдельных её частей (Рис. 4).

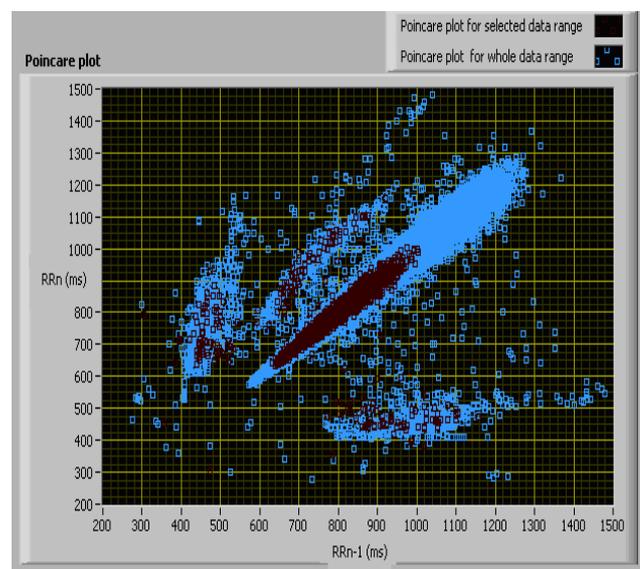


Рис. 3. График Лоренца

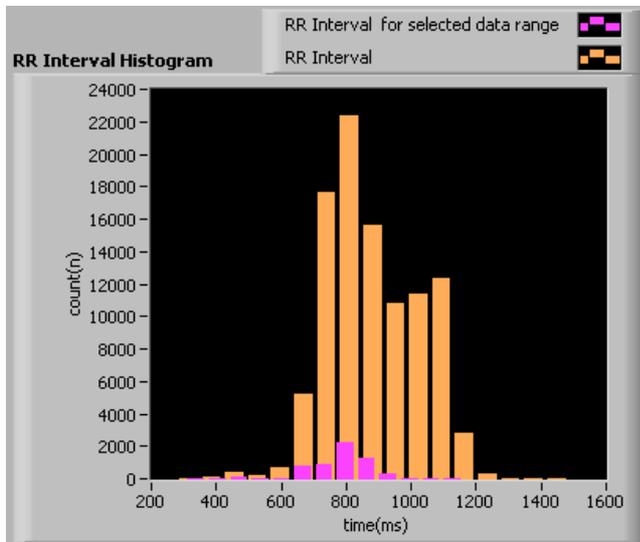


Рис. 4. Гистограмма распределения кардиоинтервалов

Предварительное тестирование системы показало её способность оценивать качество восстановления регуляторных резервов организма во время сна или отдыха (здоровые лица, спортсмены и т.п.), а также выявлять признаки возрастания угрозы внезапных сердечных событий.

Выводы

Внедрение разработанных программ предусматривается для групп больных с угрозой внезапной смерти, а также для оценки режимов перегрузки у практически здоровых людей. Метод анализа ССР не требует нагрузочных тестов, а наблюдение за состоянием сердечно-сосудистой системы человека происходит непосредственно в режиме функционирования.

Литература

1. В. Феллер Введение в теорию вероятностей и ее приложения, в 2-х томах, Москва, 1984.
2. А.Н. Колмогоров Проблемы передачи информации. Том I, Вып. 1, стр. 4-11, 1965.
3. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. Введение. – М.: Мир. – 1990. – 344 с.
4. Николис Дж. Динамика иерархических систем: Эволюционное представление. // Пер.с англ.- М.-Мир,- 1989.- 488 с. 133.

5. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика.- М.: – Наука. – 2000. - 431 С.
6. Юсупов Р.М., Полонников Р.И. Телемедицина – новые информационные технологии на пороге XXI века.-Санкт-Петербург.- 1998.- 490с.
7. Cohen M.E., Hudson D.Z., Anderson M.F. The effects of drugs on chaotic blood flow analysis in an animal model // Proc. Annu. Inf. Conf IEEE Eng. Med and Biol. Soc., Orlando, FL.- New York – 1991. – Vol. 13, Pt 5/5. – P. 2200-2201.
8. Goldberger A.L., Rigney D.R. Sudden death is not chaos // Dynamic Patterns in Complex Systems. // Singapore: World Scientific, 1988.- P 119-124.
9. Goldberger A.J., Rigney D.R., West B.J. Chaos and fractal in physiology. // Scientific Amer. – 1990. – N2. – p. 35-41.
10. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA – 1991; 88: 2297-2301.
11. Pincus S.M., Goldberger A.L. Physiological time-series analysis: What does regularity quantify? // Am J Physiol – 1994; 266 (Heart Circ Physiol): H1643-H1656.
12. Ryan S.M., Goldberger A.L., Pincus S.M., Mietus J., Lipsitz L.A. Gender and age-related differences in heart rate dynamics: Are women more complex than men? // J Am Coll Cardiol – 1994; 24: 1700-1707.
13. Ho KKL, Moody G.B., Peng C.K., Mietus J., Larson M.G., Levy D., Goldberger A.L. Predicting survival in heart case and control subjects by use of fully automated methods for deriving nonlinear and conventional indices of heart rate dynamics. // Circulation – 1997 (August); 96 (3): 842-848.
14. Beckers F., Remaekers D., Aubert A.E. Approximate entropy of heart rate variability: validation of methods and application in heart failure // Cardiovascular Engineering, v.1, #4. – 2001, p. 177-182.