

УДК 534.6 + 612.172.4: 57.02

А.А. Кузнецов, С.А. Пермяков

О ЕСТЕСТВЕННОЙ НОРМАЛИЗАЦИИ ДИАГРАММЫ РИТМА СЕРДЦА

Владимирский государственный университет

По данным ЭКГ весенней серии 230 регистраций проведен структурно-топологический анализ на базе ярусной технологии обработки диаграмм ритма сердца с использованием параметров энтропии. Введено понятие избыточной продукции информационной энтропии и проанализировано изменение этого параметра. По данным анализа сделан вывод о механизме естественной нормализации ритма сердца. Предложено использовать результаты работы для формирования «эталонного ритма» с реализацией в форме виртуальной диаграммы ритма сердца. Предложена физиологическая трактовка «эталонного ритма» и исследованы его характеристики.

Ключевые слова: электрокардиограмма, нормальный закон распределения, виртуальная диаграмма ритма сердца.

Разнообразное и большое количество поступающих к сердцу электрических сигналов и влияний иной природы приводит к их совместному воздействию на электрическую (возбуждение и проводимость) и сократительную функции сердца. Аддитивный и мультипликативный характер реализации текущего результирующего действия на проведение электрического сигнала по электропроводящей системе сердца и механическое сокращение миокарда создают своеобразную динамическую базу флуктуаций регистрируемых параметров электрокардиографического сигнала [1–4].

Для изолированного сердца *invitro* эта динамическая база, во-первых, сильно обеднена, а во-вторых – происходит смена управляющего сигнала со стороны центральной нервной системы на «внутреннюю» функцию автоматии сердца. В таком случае при «назначенной» частоте и амплитуде разрядов групп кардиомиоцитов активной среды, например, в синоатриальном узле, на электрокардиограмме расстояние между соседними зубцами R будет неизменным, а амплитудные значения этого зубца (или QRS комплекса) будут медленно падать за счет постепенно выходящих в раствор ионов. Сократительная функция сердца при этом также будет медленно терять выраженность, в частности, за счет выхода ионов кальция [4].

Для сердца *invivo* здоровых молодых людей флуктуации регистрируемых параметров управляющего сигнала имеют почти симметричное распределение около среднего значения. Так слабая асимметрия в норме характерна для всех распределений ритмограмм и связана с конечным размером параметрических выборок, захватывающих лишь часть периода долгопериодических медленных волн влияния [3]. Коэффициенты асимметрии и эксцесса таких распределений с ростом длины записи имеют почти периодическую затухающую динамику, определяемую структурой медленной волны [2, 5]. Ослабление корреляции сигналов внешних источников с управляющим сигналом, в частности, за счет адаптации, приводит к результирующему ослаблению их влияния, что в параметрических распределениях отражается падением вероятности проявлений этих событий при удалении от наиболее вероятного (среднего). Дальние корреляции отражены более редкими событиями. Таким образом, стандартное отклонение можно трактовать удвоенной амплитудой флуктуаций регистрируемых параметров основного сигнала, при котором влияние иных внешних источников остается статистически значимым. Но является ли это влияние функционально значимым?

Цель работы – определение механизма естественной нормализации диаграммы ритма сердца для здоровых молодых людей в состоянии покоя.

О роли эргодической гипотезы для проведения статистического анализа

Объектами статистического анализа являются ритмограммы, или диаграммы ритма сердца (ДРС) здоровых молодых людей, представленные в графическом и цифровом форматах. Первая стадия подготовки их к проведению статистического анализа включает в себя проверку

стационарности записей, или одинакового качества стохастичности реализуемых для анализа участков ритмограмм. Положительным результатом такой проверки принято считать выполнения в той или иной мере (приближении) эргодической гипотезы Больцмана. Ритмограммы могут составлять группу статистического ансамбля только по тем параметрам, значения которых, осредненные по группе и по времени, не отличаются. Мера выполнения этой гипотезы по тому или иному параметру определена величиной расхождения указанных значений. Но чаще при такой проверке исследователи занимают прагматичную позицию, оценивая по кривой экспериментального полигона форму функции распределения приборной реализации сигнала. Сравнивая, оценочные функции распределения, делают вывод об одинаковой или неодинаковой природе флуктуаций, и далее, о возможности сопоставления реализаций сигналов внутри статистического ансамбля. Оставляя в стороне критику такого подхода, заметим, что при многофакторном анализе он теряет свою привлекательность по признаку прагматичности.

Выполнение эргодической гипотезы для термодинамических систем как совокупности материальных точек составляющих статистический ансамбль, свидетельствует о состоянии равновесия. Для реальных систем выставляется необходимое требование одинаковости этих систем – «изготовления всех систем по одному рецепту». С ростом числа параметров растет и сложность выполнения этого требования. При исследовании ритмограмм разных людей можно лишь приблизиться к условиям эргодичности, выполнением некоторых и одинаковых для всех обследуемых требований. Они должны быть молодыми, одного возраста и здоровыми, одной силы и направленности мотиваций, одним распорядком дня и желательным темперамента. Все эти требования в той или иной мере удовлетворяют одной группе студентов второго курса обучения в государственном университете. Однако сильное различие может быть в темпераменте, определяющем психические и эмоциональные проявления. В состоянии психоэмоционального покоя средние значения параметров variability ритма сердца (HRV) в рамках доверительных интервалов должны быть одинаковыми и постоянными для группы и для любой одиночной серии регистраций.

Методика и результаты эксперимента

По данным регистраций электрокардиограмм (ЭКГ) студентов одной группы (24 человека) за февраль – май 2012 г., получено 230 ритмограмм в форме цифровых рядов последовательностей R-R интервалов на ЭКГ. Ритмограммы, как носители фазовой (информационной) составляющей ЭКГ, выбраны в качестве объектов исследования с использованием инструментов структурно-топологического анализа на базе ярусной технологии [2, 6].

При использовании ярусной технологии обработки диаграмм ритма сердца (ДРС) ширина столбца гистограммы становится равной шагу дискретизации записи ЭКГ по временной оси. В таком случае известная форма Шеннона расчета информационной энтропии $I = -\sum p_i \log p_i$ может быть переписана в виде $I^* = (A/n) \log \Gamma$, где A – переводной коэффициент, n – объем выборки (размер цифрового ряда), Γ – полиномиальный коэффициент, аналог термодинамической вероятности в формуле Больцмана для расчета энтропии термодинамической системы. Использование второй формулы обретает ясный физический смысл, но по сравнению с формой Шеннона имеет небольшую погрешность (2–3%), монотонно уменьшающуюся с ростом n [2, 6].

Предположение о естественной нормализации ритма сердца позволяет использовать в качестве критерия предельного состояния ритма расчетную величину энтропии $H(X) = \log[(2\pi e)^{0.5} \sigma / \Delta x]$ бесконечного ряда случайных чисел, распределенных по нормальному закону. Расчетному значению I^* определенной ритмограммы ставится в соответствие это значение, рассчитанное для стандартного отклонения ритмограммы при постоянном шаге дискретизации $\Delta x = 1$ мс. При этом всегда выполняется неравенство $I^* < H(X)$ [2].

Экспериментально доказанным фактом является функциональная зависимость I^* от стандартного отклонения σ ритмограммы в форме: $I^* = \log_2 3\sigma - i$ [2], которая и является основным аргументом для выдвинутого выше предположения. Тогда отклонение $\delta H(X) = H(X) - I^*$ должно зависеть от величины нового параметра i . На рис. 1 приведены точечные графики этой зависимости для комбинированных и серийных регистраций ЭКГ.

При комбинированных регистрациях ЭКГ группы, состоящей из 24 человек (130 регистраций), каждый обследуемый проходил 5–8 регистраций. Серийные регистрации проводились для двух студентов (по 50 регистраций) той же группы ежедневно вечером в течение двух месяцев (март – апрель).

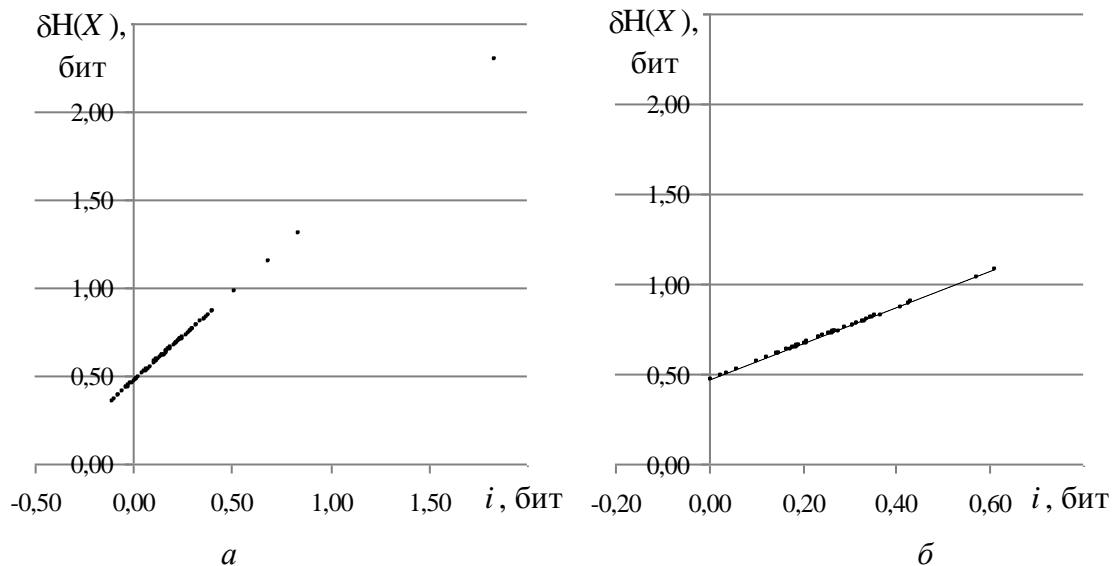


Рис. 1. Графики зависимости $\Delta H(X)(i)$ для комбинированных (а) и серийных (б) регистраций. Приведены линии тренда (штриховая линия)

Обсуждение результатов

Линии тренда на обоих графиках рис. 1 определяют прочную линейную функциональную связь между параметрами в форме: $\delta H(X) = i + 0,4612$ с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 1$. Простая подстановка приведенных ранее формул в полученную зависимость при $i = 0$ дает тот же результат с такой же точностью. Однако и при $i \neq 0$ полученная закономерность не меняется. Она остается неизменной с той же достоверностью для всех проверенных длин записей ЭКГ других людей: от 3 минут – до 4 часов. Аддитивная постоянная $\delta i = 0,4612$ бит не зависит от объема выборки в указанных пределах проверки, а, следовательно, не зависит от погрешности выбора расчетной формы информационной энтропии I^* (см. выше). Источником этой постоянной оказалась частота оцифровки данных ЭКГ, или шаг дискретизации ЭКГ. С ростом частоты и уменьшением Δx количество значащих цифр в значениях R-R интервалов растет, вызывая рост I^* .

Основные параметры $H(X)$ и I^* определены посредством функциональной связи со стандартным отклонением σ . Можно сказать, что модуль разности между ними равен постоянной величине $\delta i = 0,4612$ бит с точностью до переменной величины i , корректирующей взаимоотношения указанных функций при текущем изменении σ . В рамках такой трактовки параметрических связей исследуем поведение параметра i при текущих изменениях параметров $H(X)$ и I^* . При росте величины σ величина параметра $H(X)$ всегда функционально растет ($\Delta H(X) > 0$), но при этом величина I^* может расти ($\Delta I^* > 0$), оставаться неизменной ($\Delta I^* = 0$) и даже уменьшаться ($\Delta I^* < 0$) (табл. 1).

Как известно [2, 5–7], информационная энтропия количественно определяет степень неупорядоченности (хаотичности) распределения значений R-R интервалов на ДРС. Но как сопоставить нарастающую структуризацию ДРС ($\Delta I^* < 0$) с ростом σ , и наоборот? Для обоснования таких событий и по форме записи $I^* + i = \log_2 3\sigma$, обозначим параметр i избыточной продукцией энтропии [2]. Его реакции на разные случаи взаимоотношений основных параметров проанализированы в таблице.

Таблица 1

Изменение избыточной продукции энтропии ритма сердца

Параметры	$\Delta H(X) > 0,$ $\Delta I^* > 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* < 0$	$\Delta H(X) > 0,$ $\Delta I^* < 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* = 0$	$\Delta H(X) < 0,$ $\Delta I^* > 0$
$ \Delta H(X) > \Delta I^* $	$\Delta i > 0, i \uparrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow\uparrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i < 0, i \downarrow$
$ \Delta H(X) < \Delta I^* $	$\Delta i < 0, i \downarrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow$	$\Delta i > 0, i \uparrow\uparrow\uparrow$	–	$\Delta i < 0, i \downarrow$
Частота события, (%)	очень часто (48 %)	очень часто (48%)	редко (2 %)	очень редко (1%)	очень редко (1%)
№№ столбцов	1	2	3	4	5

Как видно, на направление и силу реакции значительное влияние оказывает относительная скорость изменения I^* . При одновременном росте основных параметров и опережении $\Delta H(X) > \Delta I^*$ предоставляемая величина стандартного отклонения превышает требуемую для структуры ритма. Величина I^* меньше необходимой, что восполняется растущей (\uparrow) величиной i .

Данные первых двух столбцов определены относительно небольшими абсолютными значениями i и малыми их изменениями. Данные трех других столбцов связаны с отходом значения i от нормы (около нуля) до значений 0,4 – 0,6. Третий столбец содержит данные о сильном росте i при противоположном изменении основных параметров. После этого обычно наступают корректирующие события, описываемые в 4 и 5 столбцах.

Причинно-следственные отношения определены в 96 % событий (табл.). Редкие события асинхронного изменения основных параметров указывают на причинную роль механизма регуляции, задающего величину стандартного отклонения. Внутри взаимоотношений основных параметров латентные изменения величины I^* – реакционные. Так рост величины I^* при $\Delta H(X) < 0$ (столбец 5) свидетельствует о быстрой релаксации регуляции ритма. Неупорядоченность ритма сердца непрерывно подстраивается под переменное влияние вегетативной нервной системы, сигнализируя о степени напряжения адаптационных механизмов и корректируя работу механизмов регуляции ритма текущей самонастройкой нормализации распределения под каждый новый задаваемый уровень стандартного отклонения.

Виртуальная диаграмма ритма сердца

До настоящего времени применение метода физических аналогий и сопоставлений для реальных диаграмм ритма сердца (ДРС) не было успешным. Отсутствие «эталона» приводило к необходимости парного сравнения ДРС. На основе проведенного исследования и в качестве эталонной ДРС, как реализации эталонного ритма сердца при ФСО в норме, предлагается виртуальная диаграмма ритма сердца. Виртуальной (воображаемой) диаграммой ритма сердца (вДРС) автор называет диаграмму, построенную генерацией случайных чисел по нормальному закону распределения около среднего значения $\langle X \rangle$ с назначенной величиной стандартного отклонения (σ) [2, 5, 6, 8].

Все основные параметры (X) варибельности сердечного ритма (ВСР) временной и частотной области, определенные по вДРС и в сравнении с ДРС здоровых людей, имеют качественно одинаковую функциональную зависимость от σ , которая практически не зависит от объема n выборки [8].

Ярусная структура вДРС с заданными первичными значениями σ и Δx наполняется однородно с учетом нормального закона распределения. При ее формировании все микропереходы между ярусами значений R-R равновероятны. При формировании ДРС предпочтение обычно (в норме) отдается соседним переходам. Это легко проверяется при построении дифференциальной ДРС [9]. Значение σ обеспечивается внешними низкочастотными процессами, проявляющихся в формах медленных волн [3]. Поэтому при формировании вДРС преобладают «процессы» диапазонов высоких (HF) и низких (LF) частот, а в случае ДРС преобладают процессы диапазонов очень низких (VLF) и ультранизких (ULF) частот [1].

Ярусная структура вДРС, определенная постоянной и не равной нулю величиной Δx , формируется без внешней регуляции, но под заданные ограничения. С ростом объема выборки величина среднего межъярусного перехода $\langle \Delta_{\text{яр}} \rangle \rightarrow \Delta x$, значение информационной энтропии монотонно стремится к значению $H(X)$, а избыток продукции энтропии i также монотонно приближается к нулю (рис. 2, а).

В формировании реальной ДРС на базе собственной функции автоматии сердца участвуют два внешних механизма: детерминистский внешней регуляции ритма с частотным механизмом наполнения ярусами и самих ярусов и хаотический, связанный с шумом внешних и внутренних влияний. Проявление первого механизма приводит к структуризации ярусной диаграммы, проявление второго – к деструктуризации. В рамках такого разделения системного процесса формирования ритма вДРС представляет только хаотическую составляющую с максимальной степенью неупорядоченности значений R-R в рамках заданной величины σ и является динамической базой механизмов адаптации организма к внешним влияниям.

«Рождение» каждого нового яруса при росте n фиксируется разными параметрами поразному. Число «рабочих» ярусов прирастает на 1, если ярус «открылся» одним значением. Величина I^* на это не реагирует, и чувствуют лишь подтверждение этого открытия еще одним значением. Поэтому ход функции $I^*(n)$ всегда запаздывает относительно $k_{\text{я}}^*(n)$. Отсюда следует очевидное правило формирования диаграммы ритма: рост $k_{\text{я}}^*$ первичен по отношению к функции их неупорядоченного формирования.

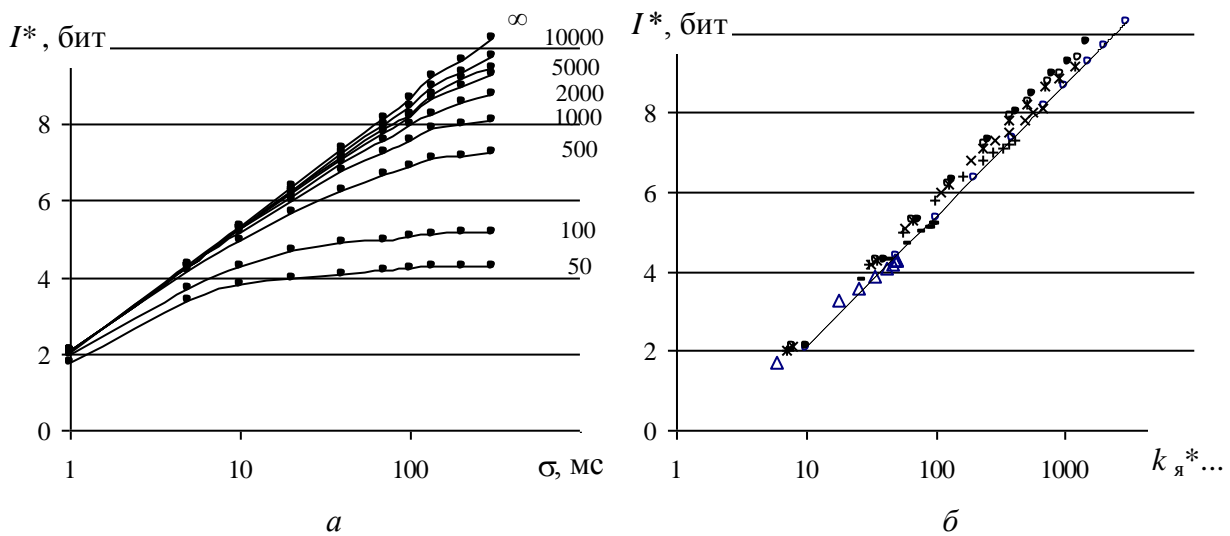


Рис. 2. Графики зависимости информационной энтропии $I^*(\sigma, n)$ (а) и $I^*(k_{\text{я}}^*, n)$ для возрастающего ряда значений σ и для разных n : 50 (Δ), 100 (-), 500 (+), 1000 (x), 3600 (ж), 10000 (\bullet) и $n \rightarrow \infty$ (o) с уравнением трендовой линии $I^* = \log_2(k_{\text{я}}^*) - 1,28$ при $R^2=1$

На рис. 2 б приведен график зависимости $I^*(k_{\text{я}}^*)$ в полулогарифмическом масштабе для разных n , построенный по возрастающему ряду значений σ (1, 5, 10, ..., 300). Видно, что при росте числа ярусов зависимость степени неупорядоченности ярусной структуры вДРС от числа ярусов на ней слабеет по логарифмическому закону.

Предложенные характеристики вДРС могут быть полезны при сравнении значений параметров реальной ДРС, описывающей регулируемое формирование диаграммы и вДРС, описывающей нерегулируемое хаотическое формирование диаграммы. Применение структурно-топологических характеристик ($k_{\text{я}}^*, I^*$) при анализе диаграмм ритма имеет очевидные преимущества над использованием параметров ВСП, так как последние могут быть адекватными в применении лишь для стационарных процессов.

Выводы

1. Причинно-следственные отношения между параметрами энтропии ДРС, являются основным доказательным аргументом естественной нормализации ритмограммы, непрерывно следующей за эффектами работы механизмов регуляции ритма сердца здоровых молодых людей в состоянии покоя.

2. Показателем степени отклонения распределения ритмограммы от нормального закона распределения является числовой параметр избытка продукции энтропии.

3. Постоянная величина $\delta i = 0,4612$ бит имеет технологическую природу и характеризует минимальный избыток продукции энтропии ДРС при заданной частоте оцифровки исходных данных ритмограмм.

4. Форма функциональной связи $\delta H(X) = i + 0,4612$ подтверждает экспериментальную форму функциональной зависимости: $I^* = \log_2 3\sigma - i$.

5. Виртуальная ДРС является математической моделью ДРС с первично заданной величиной стандартного отклонения (σ) и распределением по нормальному закону. Ярусная структура в ДРС формируется без внешней регуляции, представляет хаотическую составляющую ритма с максимальной степенью неупорядоченности в рамках заданной величины σ , определяющую динамическую базу механизмов адаптации организма к внешним влияниям.

Библиографический список

1. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // European Heart Journal. 1996. V.17. P. 354–381.
2. Кузнецов А.А. Системный анализ и обработка электрокардиографической информации: дисс. ... д.т.н. – Н. Новгород: 2012. – 297 с.
3. **Баевский, Р.М.** Введение в донозологическую диагностику / Р.М. Баевский, А.П. Берсенева. – М.: Слово. 2008. – 176 с.
4. **Анохин, П.К.** Философские аспекты теории функциональной системы: избр. труды / П.К. Анохин. – М.: Наука. 1978. – 400 с.
5. **Кузнецов, А.А.** Методы анализа и обработки электрокардиографических сигналов: Новые подходы к выделению информации: монография / А.А. Кузнецов. – Владимир: Изд-во ВлГУ. 2008. – 140 с.
6. **Кузнецов, А.А.** Энтропия ритма сердца: монография / А.А. Кузнецов. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та. 2009. – 172 с.
7. **Мун, Ф.** Хаотические колебания. Вводный курс для научных сотрудников и инженеров / Ф. Мун. – М.: Мир. 1990. – 312 с.
8. **Кузнецов, А. А.** Характеристики виртуальной диаграммы ритма сердца // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 91– 6.
9. **Кузнецов, А. А.** Структурно-топологические особенности диаграмм ритма сердца // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 80–85.

Дата поступления
в редакцию 10.10.2012

A.A. Kuznetsov, S.A. Permjakov

ABOUT NATURAL NORMALIZATION OF THE HEART RHYTHM DIAGRAM

Vladimir state university

On 230 spring series registration electrocardiogram data the structural - topological analysis on base of heart rhythm diagrams storey technologies processing with use of entropy parameters is spent. The concept of information entropy superfluous production is entered and change of this parameter is analyzed. According to the analysis the conclusion about the mechanism of natural normalization of a heart rhythm is made. It is offered to use results of work for formation of a «reference rhythm» with realization in the form of the heart rhythm virtual diagram. The physiological treatment of «reference rhythm» is offered and its characteristics are investigated.

Key words: the electrocardiogram, the normal law of distribution, the heart rhythm virtual diagram