

Энтропийная шкала регуляции ритма сердца здорового человека

А. А. КУЗНЕЦОВ

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия, e-mail: artemi-k@mail.ru

Разработаны методы измерений, системного анализа и обработки электрокардиографической информации, позволившие достоверно и количественно классифицировать уровни функционального состояния организма по степени напряжения регуляторных систем ритма сердца. Полученные результаты систематизированы на энтропийной шкале регуляции ритма сердца человека. Введено понятие нормы функционального состояния в режиме контроля ритма сердца.

Ключевые слова: электрокардиограмма, управление и регуляция ритма сердца, функциональное состояние организма.

The methods of measurements, system analysis and electrocardiography information processing allowing to classify reliably and authentically the organism functional state levels stress degree of heart rhythm regulating systems were developed. The received results are systematized on the human heart rhythm regulation entropy scale. The concept of a functional state norm in a heart rhythm control mode is introduced.

Key words: electrocardiogram, heart rhythm control and regulation, organism functional state.

На соответствие структуры материального объекта и его функций вне зависимости от масштабов объекта указывал еще Р. Декарт, описывая структурно-функциональные связи во Вселенной в форме «эфирных спиралей» [1]. В рамках современных воззрений и терминов Вселенная играет роль управляющей системы с полным соответствием ее составляющих: схемы, координатной структуры, информации и функций [2]. Структурная вариабельность объектов и место Солнечной системы и планеты Земля в этой динамической картине может свидетельствовать о непрерывной смене функционального качества этого звена и его элемента [3, 4]. Указанное соответствие И. М. Сеченов перенес на живую материю [5], а П. К. Анохин определил основным принципом функциональных систем человека [6]. Позже оно было распространено вниз по ряду иерархии функциональных систем [7] до уровня конформационных перестроек макромолекул белков [8–10]. В полном соответствии с иерархическим строением управляющих систем организм человека так

же становится в этот ряд [2]. Абсолютная универсальность предложенного принципа позволяет обсудить роль информационной составляющей системы кровообращения [11–14], которая обеспечивается в значительной мере амплитудно-частотными характеристиками ритмических процессов внешней среды влияния на ритмы сердца человека.

Цель работы — создание обобщенного критерия баланса вегетативных влияний на ритм сердца и достоверного числового классификатора уровней и стадий функционального состояния организма (ФСО).

Экспериментальная часть. В рамках донозологического контроля в течение четырех лет проведены 433 двадцатиминутные регистрации ЭКГ монитором Холтера комплекса амбулаторной регистрации электрокардиосигнала «AnnAFlash 3000» [15] у 72 условно здоровых молодых студентов 1–4 курсов. Регистрировали ЭКГ во втором грудном отведении для трех разных групп молодых людей (18–22 года) в положении покоя сидя в разное время суток и разное время года (весна, лето, осень, зима). Для группы № 1, состоящей из 20 юношей и 12 девушек (19–22 года), проведено 32 понедельные единичные регистрации в течение 9 недель (февраль — март 2008 г.) в интервале времени 14–19 ч. Для группы № 2 из 18 юношей и 11 девушек — 73 регистрации за период февраль — июнь 2009 г. в интервале времени 13–17 ч. Для группы № 3, состоящей из 8 девушек 18–19 лет, исследованы 48 понедельных регистраций ЭКГ за сентябрь — ноябрь 2009 г. в период с 12 до 14 ч.

Посуточные регистрации ЭКГ юноши Ю. и девушки (21 год) проходили тремя сезонными сериями по 5–7 недель каждая в одинаковых условиях покоя в вечернее время.

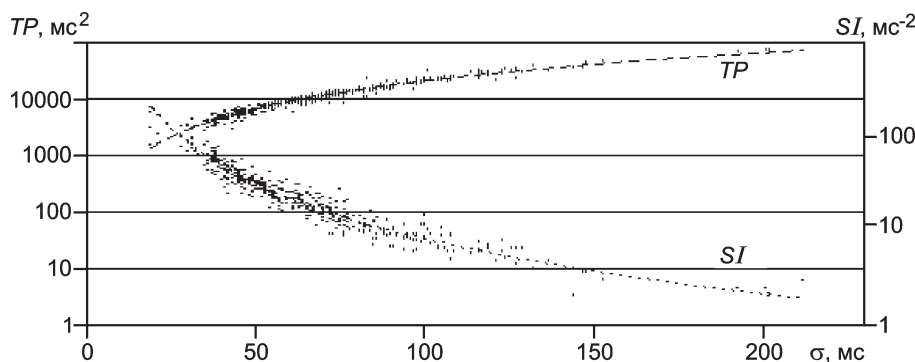


Рис. 1. Комбинированная параметрическая диаграмма $TP(\sigma)$ и $SI(\sigma)$: показаны линии тренда $TP = 11\sigma^{1.63}$ при $R^2 = 0,95$ и $SI = 6 \cdot 10^4 \sigma^{-1.93}$ при $R^2 = 0,94$

Все серийные регистрации количеством $N_{\text{рег}} = 234$ выполняли в домашних условиях при температуре 20—22 °С в положении лежа на спине. Серия 45 суточных регистраций для юноши Р. в течение двух недель сделана в переносном варианте работы монитора в режиме накопления ЭКГ-информации.

В программе EScreen [16] данные ЭКГ конвертировались в диаграммы ритма сердца (ДРС) и определялись выборочные значения параметров variability сердечного ритма (BCR). Объектом исследования являлись синтезированные по параметрам BCR указанных групп и серий регистраций параметрические цифровые ряды.

Функциональная связь между параметрами BCR. Вариативность сердечного ритма — адекватная характеристика универсальной оперативной реакции целостного организма на любое воздействие внешней среды посредством системы регуляции сердечного ритма, включающей в себя центральную и вегетативную нервные системы (ВНС), ряд гуморальных механизмов и систему интеро- и экстерорецепторов [13, 14, 17]. Для определения управляющего параметра этой реакции, обеспечивающего эффективность работы системы регуляции сердечного ритма, воспользуемся известным методом оценки BCR, основанным на трех аналитических подходах к ритмограмме: временном, частотном и критериальном, в которых используются статистические, спектральные и производные параметры, соответственно [13, 14, 17, 18]. Для уменьшения числа информационно дублирующих друг друга параметров [18, 19] из каждого подхода выберем по одному: стандартное отклонение σ , полную спектральную мощность (Total Power) TP и индекс напряжения регуляторных систем организма (стресс-индекс) SI , значения которого косвенно характеризуют суммарную активность симпатического отдела ВНС. Параметры σ и TP аналогичны по физиологическому смыслу, но первый из них характеризует не только периодические, но и нелинейные и аperiodические фрактальные компоненты ритмического процесса [14]. Отметив известные антагонистические отношения двух контуров вегетативной регуляции ритма сердца и обратную зависимость TP и SI от роста активности симпатического отдела ВНС [14], исследуем зависимость $TP(\sigma)$ и $SI(\sigma)$ по всем группам и сериям измерений (рис. 1).

Принято считать, что зависимость $TP(\sigma)$ имеет квадратичную форму [13, 14], тогда в полулогарифмическом масштабе она приобретает форму прямой линии заданного наклона. В приведенном общем случае (см. рис. 1) показатель степени при σ меньше двух, что указывает не только на наличие нелинейных и аperiodических фрактальных компонентов на ДРС обследуемых, но и позволяет определить интервал $\Delta\sigma = 40 \dots 60$ мс, где их проявления максимальны. На этом участке максимальной кривизны графика $TP(\sigma)$ сосредоточено более половины всех данных, но на этом же интервале $\Delta\sigma$ рассеяние расчетных данных относительно трен-

довой функциональной линии графика $SI(\sigma)$ наибольшее. Наибольшая чувствительность ритма к внешним влияниям, характеризуемая изменением спектральной мощности, связана с неустойчивым эмоциональным состоянием молодых людей в интервале двадцатиминутной регистрации при общей обратимости функциональных параметрических связей. Количественное определение искомой нормы ФСО оказалось «размазанным» по двум кривым соответствующих параметрических рядов (см. рис. 1). Иными словами, получены не количественные характеристики ФСО, а параметрические функции режимов работы системы регуляции.

В состоянии относительного покоя сердце здорового человека иннервируется ВНС. Баланс между тонусом симпатического и парасимпатического отделов ВНС устанавливается по совокупности реакций организма на переменные внешние условия, включая социальные. При многогранности внешних влияний [6, 11, 12, 20, 21] балансное состояние механизма вегетативной регуляции ритма сердца в норме обязано быть многофакторным, динамическим и обладать свойством обратимости. Отсутствие полных сведений обо всех факторах влияния диктует применение конечного интегрального критерия с функцией управляющего посредника влияний переменных внешних условий на организм и гаранта установления соответствующих их динамике уровней и стадий подобия ФСО, т. е. ответственного за это состояние в рамках обобщенного динамического режима работы ВНС.

Обобщенные критерии баланса вегетативных влияний на ритм сердца. Обе параметрические функции $TP(\sigma)$ и $SI(\sigma)$ на комбинированной диаграмме (см. рис. 1) характеризуют две стороны одного и того же механизма вегетативной регуляции ритма по степени централизации [14] и они же являются физическими (измеряемыми) величинами: $[SI] = [\text{мс}^{-2}]$ и $[TP] = [\text{мс}^2]$. При их противоположном трендовом распределении вдоль оси абсцисс резонно ожидать, что физически значимым безразмерным параметром баланса вегетативной регуляции может стать согласованное произведение параметрических рядов $(TP \cdot SI)/100$. Для удобства эстетического восприятия значений нового параметра умножим его на коэффициент 10^{-2} . В результате получим синтезированный цифровой ряд параметра $TP \cdot SI \cdot 10^{-4}$, определяю-

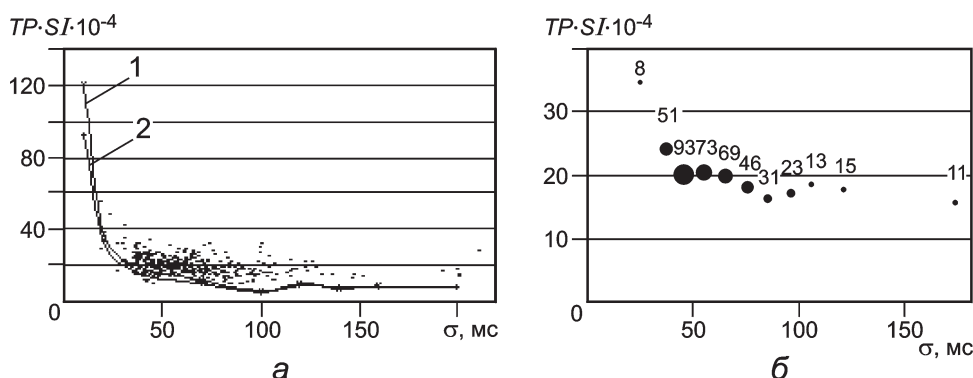


Рис. 2. Точечная параметрическая диаграмма распределения $TP \cdot SI(\sigma)$ с кривыми виртуального ритма для $n = 1500$ (1); 2000 (2) (а) и соответствующее двухпараметрическое массовое распределение (б) с обозначениями числа N исходов (масс)

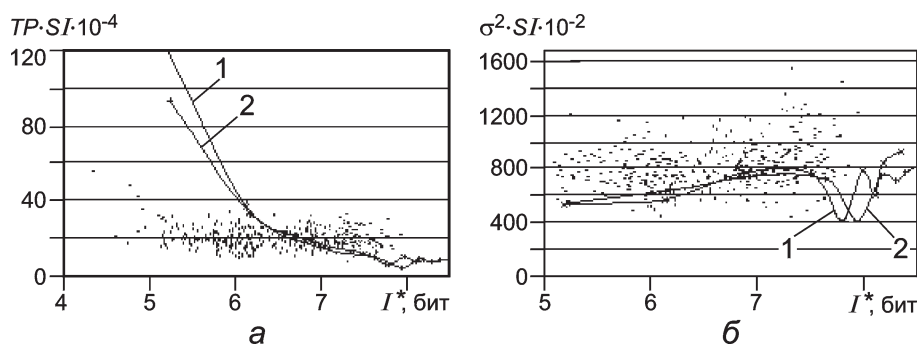


Рис. 3. Точечные диаграммы распределений критериев подобия ФСО при $n = 1500$ (1); 2000 (2):
 $a — TP \cdot SI \cdot 10^{-4} (I^*)$; $b — \sigma^2 SI \cdot 10^{-2} (I^*)$ [28]

ший обобщенное по всем группам и сериям регистраций распределение по оси абсцисс (рис. 2, а).

Воспользуемся встроенной в программу Excel процедурой генерации случайных чисел по нормальному закону с заданными параметрами: средним значением RR -интервалов $\langle X \rangle = 811$ мс и шагом дискретизации $\Delta x = 1$ мс; переменными параметрами $n = 1500, 2000$; $\sigma = 10 \dots 200$ мс. В результате получим два цифровых ряда виртуальных ритмограмм (ВР), каждая из которых представляет идеализацию соответствующей реальной ритмограммы по признаку максимально выраженной хаотической составляющей или минимально выраженного результирующего эффекта регуляции ритма [22–25]. Соответствующая функция $TP \cdot SI_{ВР}(\sigma)$ виртуального ритма [24] медленно и монотонно спадает по закону $TP \cdot SI_{ВР} = 77 \cdot 10^4 \sigma^{-0.5}$ при коэффициенте аппроксимации $R^2 = 0,91$.

Представленное распределение точечных значений (рис. 2, б) достоверно определено трендовой функциональной кривой формы $TP \cdot SI = 77 \cdot 10^4 \sigma^{-0.5} + 9$ при $R^2 = 0,78$, но без учета распределения статистических масс изображающих точек. Для всего распределения $\Delta \sigma = 20 \dots 200$ мс шкалы аргумента среднемассовое значение критерия $TP \cdot SI \cdot 10^{-4}$ составляет $20,0 \pm 0,5$.

По форме распределения можно заметить, что максимальное массовое отклонение от указанной формы функциональной кривой тренда приходится на диапазон 45–65 мс шкалы аргумента и имеет форму горизонтальной полочки

для среднемассового значения критерия $TP \cdot SI \cdot 10^{-4}$ $19,95 \pm 0,05$. В этом диапазоне его значения представлены 235 регистрациями и практически не зависят от изменений аргумента σ .

Кривые виртуальных рядов (см. рис. 2, а) определяют нижнюю границу параметрического распределения, ответственную за хаотическую составляющую ритма сердца при работе систем регуляции и управления в режиме контроля. Этот режим для здорового человека характеризуется постоянным максимальным тонусом парасимпатической системы и минимальным — симпатической системы. Такая норма по признаку максимальной неупорядоченности ритма сердца имеет адекватный количественный критерий — информационную энтропию I^* [25–28].

Энтропийная шкала регуляции ритма сердца здорового человека.

Оценим структурно-функциональные отношения для ДРС распределениями значений обобщенных параметров $TP \cdot SI \cdot 10^{-4}$ и $\sigma^2 SI \cdot 10^{-2}$ [28] по шкале информационной энтропии, отвечающей за баланс хаотической и детерминистской составляющих в структуре ритма сердца. Диаграммы этих распределений представлены множествами точечных значений в форме «гантели» и разбиты по оси абсцисс на два условных подмножества: левое для $I^* \leq 6,4$ бит и правое для $I^* \geq 6,5$ бит (рис. 3, а, б).

Данные обследуемого пациента Р. практически полностью приходится на среднюю область распределения $TP \cdot SI \cdot 10^{-4} < 20$ (см. рис. 3, а) и сдвинуты влево относительно кривых ВР. Левая часть графиков распределений представлена в основном данными летней серии измерений обследуемого Ю., страдающего поллинозом, а правая граница — данными молодых людей, регулярно занимающихся спортом.

Форма распределений на рис. 3 а, б указывает на наличие критической области по параметру $I^*_к$ в диапазоне 6,4–6,5 бит, при переходе через которую происходит изменение качества параметрической связи: для левого подмножества — с превалированием детерминистского влияния, для правого — с превалированием влияния хаотической составляющей ритма. Это может означать, что при сдвиге от критической

области и влево, и вправо симпатическое и парасимпатическое влияния на ритм сердца сбалансированы. На левой и правой границах распределения наступает дисбаланс с ростом сильного превалирования симпатического или парасимпатического влияний, соответственно. В таком представлении данные правой границы описывают приближение к состоянию «изолированного сердца», данные левой границы — к преморбидному состоянию.

Шкала ФСО: дискретно-непрерывное распределение параметров. Для анализа обнаруженной области деления точечных значений параметрических множеств рас-

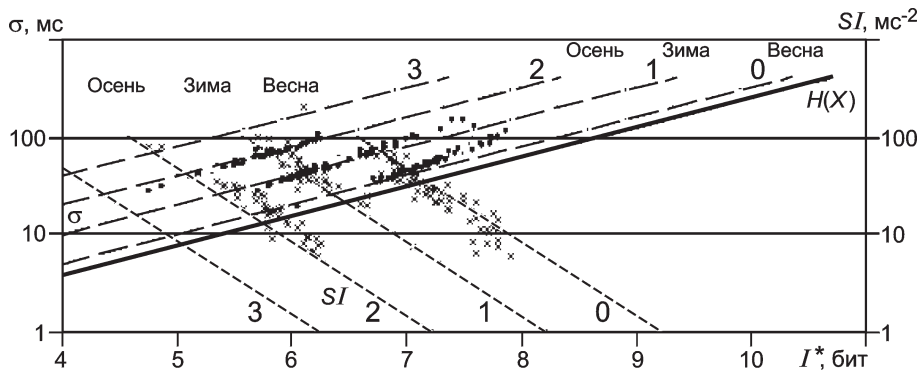


Рис. 4. Графики функциональных связей параметров ВСР и информационной энтропии для всех регистраций ЭКГ молодых здоровых людей; показаны линии тренда

смотрим зависимость основных параметров ВСР от информационной энтропии ритма сердца. В полулогарифмическом масштабе на рис. 4 приведены точечные графики зависимости основных выборочных параметров ВСР от соответствующих значений информационной энтропии по всем N ДРС.

Оказалось, что указанные области подмножеств (см. рис. 3 а, б) являются проявлением дискретно-непрерывной шкалы по оси абсцисс по всем трем параметрам ВСР (см. рис. 4). Данные юношей (х) и девушек (•) разных групп и серий измерений распределены в полулогарифмическом масштабе по трем функциональным линиям равного наклона. Трендовые линии функциональных связей $\sigma(I^*)$, $TP(I^*)$, $SI(I^*)$ соответствуют формам $I^* + i = \log_2(3\sigma)$, $I^* + i = \log_2[1,3TP^{0,5}]$, $I^* + i = \log_2[450SI^{-0,333}]$ при $R^2 = 0,94...0,95$.

По формам записи параметр дискретизации i назван «избытком продукции энтропии» ритма сердца. Условно-сезонное дискретно-непрерывное распределение параметров для разных уровней и стадий ФСО молодых и здоровых людей очевидно. Каждому дискретному уровню ФСО поставлено в соответствие его собственное сезонное значение: $i = 0$ (для весны), $i = 1$ (зимы), $i = 2$ (осени). При этом линия $i = 0$ соответствует норме ФСО, а эталонный уровень ФСО оценивается по графику функции энтропии $H(X) \approx \log_2(4,13\sigma)$ при объеме выборки $n \rightarrow \infty$ для нормального закона распределения (рис. 4) [26]. Эти две параллельные прямые линии в полулогарифмическом масштабе отстоят друг от друга на $\Delta i \approx 0,5$ бит.

Распределение на параметрической плоскости $\{H(X), I^*\}$ приведено на рис. 5, а по данным 829 групповых и серийных регистраций молодых и здоровых людей одного возраста, включая обозначенные выше 433 регистрации. Форма распределения аналогична приведенной на рис. 4: трендовые линии всех трех прямых отстоят на $\Delta i = 1$ бит. Переход от оси OI^* к $OI^* + i$ приводит к коррекции масштаба для всех точечных данных, распределение становится линейным $H(X) = (I^* + i) + 0,464$ бит при $R^2 = 1$ (рис. 5, б). Параметр i служит показателем отклонения от нормального распределения с точностью до аддитивной постоянной 0,464 бит для двадцатиминутной записи ЭКГ.

Вся система трендовых линий имеет форму сетки классификатора уровней и стадий ФСО по параметру i с признаками самонастройки при изменении: физиологического режима — установленного порядка жизни человека (работы, питания, отдыха, сна) и связанных с этим условий регистрации; частотных характеристик измерительной техники и параметров регистрации (интервала времени, объема выборки, приборной частоты сканирования и шага дискретизации). При этом необходимо понимать, что рост σ в рамках двадцатиминутной регистрации опережает рост I^* , и при фиксированном объеме выборки n распределение данных испытывает нарастающее отклонение от линий сетки классификатора. При $\sigma > 80$ мс и фиксированном значении n распределение просто не успевает сформироваться по нормальному

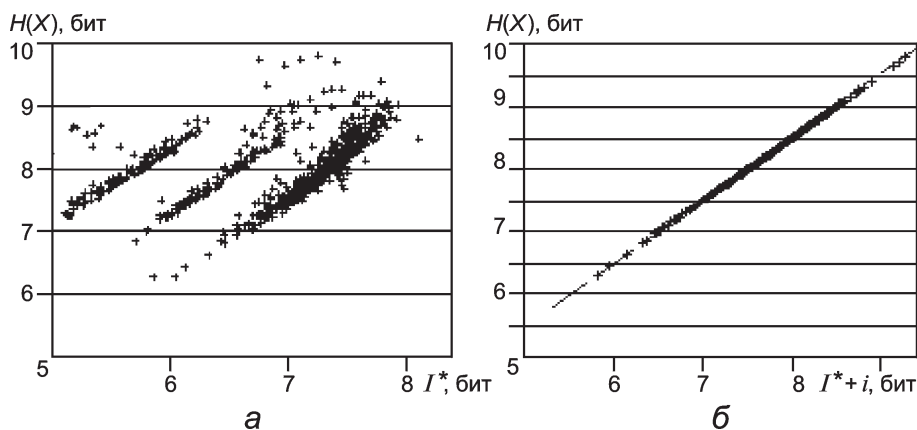


Рис. 5. Диаграммы распределения функциональных связей математического ожидания энтропии для нормального распределения и информационной энтропии ДРС (а) и с поправкой на значение i (б)

закону. Поэтому линии сетки согласованно деформируются при отклонении всех значений влево по оси абсцисс. Например, при переводе тела человека из горизонтального положения в положение сидя с сохранением состояния относительного покоя, верхние части линии сетки классификатора увеличивают кривизну, что в полулогарифмическом масштабе соответствует увеличению их угла наклона к горизонтальной оси. При этом расстояние между линиями сетки уменьшается до 0,8 бит (см. рис. 4). Аналогично сетка классификатора ФСО ведет себя при значительном уменьшении приборной частоты сканирования или увеличения шага дискретизации. Такую согласованную деформацию всей системы классификатора ФСО можно назвать преломлением через соответствующее изменение или самонастройкой. Выпрямление линий сетки в полулогарифмическом масштабе возможно лишь при значительном увеличении длины записи ЭКГ или объема n выборки. При прочих равных условиях сетка классификатора в полулогарифмическом масштабе, деформируясь, сдвигается медленно и ускоренно влево по оси абсцисс при уменьшении объема выборки n и, выпрямляясь, медленно и вправо — при росте n .

Выводы. Распределения значений обобщенных параметров $TP \cdot SI \cdot 10^{-4}$ и $\sigma^2 SI \cdot 10^{-2}$ по шкале информационной энтропии имеют форму «гантели» с тремя выраженными областями подобию ФСО: левая для $I^* \leq 6,4$ — бит, правая — $I^* \geq 6,5$ бит и средняя $I_k^* = 6,4 ... 6,5$ бит балансного состояния механизма регуляции ритма сердца.

Форма дискретно-непрерывной шкалы ФСО указывает на наличие системной режимной связи управления со стороны головного мозга, центральной нервной системы и регуляции со стороны ВНС. Управляющими параметрами регуляции и управления ритма сердца являются информационная энтропия и избыток ее продукции, соответственно.

Вся система трендовых линий имеет форму сетки классификатора уровней и стадий ФСО по параметру i с признаками самонастройки ее формы при изменении физиологического режима человека или частотных характеристик измерительной техники и параметров регистрации. Функциональные трендовые формы параметрических распределений характеризуют режимы нормы и динамического балансного состояния механизма вегетативной регуляции ритма

сердца на каждом уровне ФСО, обладая свойством обратимости баланса влияний симпатического и парасимпатического отделов ВНС.

Уровень нормы ФСО или начала отсчета по энтропийной шкале оценивается функцией $\sigma(I^*)_{i \leq 0}$ и определен работой системы регуляции ритма сердца в режиме контроля при «отключенном» влиянии управляющего сигнала на качество ритма сердца, но с сохранением динамической базы непрерывного контроля его проведения. Режим контроля характеризуется постоянным минимальным симпатическим влиянием и слабопеременным максимальным парасимпатическим влиянием на ритм сердца. При росте величины i ($i = 1, 2$ бит) режим собственно регуляции на каждом уровне ФСО может характеризоваться относительным ростом, а при $i \geq 2$ бит — абсолютным ростом симпатического влияния на ритм сердца.

Л и т е р а т у р а

1. **Декарт Р.** Первоначала философии. Т. 1 / Пер. с лат. и франц. М.: Мысль, 1989.
2. **Математическая** энциклопедия. Т. 5. / Гл. ред. И. М. Виноградов. М.: Сов. энциклопедия, 1984.
3. **Шкловский И. С.** Вселенная, жизнь, разум. М.: Наука, 1976.
4. **Шредингер Э.** Пространственно-временная структура Вселенной / Пер. с англ. М.: Наука, 1986.
5. **Сеченов И. М.** Рефлексы головного мозга // В кн.: Сеченов И. М., Павлов И. П., Введенский Н. Е. Физиология нервной системы. Избр. труды. Вып. 1. М.: Медгиз, 1952. С. 143—211.
6. **Анохин П. К.** Философские аспекты теории функциональной системы. Избр. труды. М.: Наука, 1978.
7. **Блюменфельд Л. А.** Информация, термодинамика и конструкция биологических систем // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 7. С. 88—92.
8. **Кастлер Г.** Возникновение биологической организации. М.: Мир, 1967.
9. **Биофизика:** Учебник / Под ред. П. Г. Костюка. Киев: Выща шк., 1988.
10. **Рубин А. Б.** Биофизика. Т. 1. Теоретическая биофизика: Учебник для вузов. М.: Книжный дом «Университет», 1999.
11. **Бехтерев В. М.** Объективная психология. М.: Наука, 1991.
12. **Яшин А. А.** Живая материя: Ноосферная биология. Т. 3. М.: Изд-во ЛКИ, 2007.
13. **Heart rate variability.** Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use // *Europ. Heart J.* 1996. V. 17. P. 354—381.
14. **Баевский Р. М., Берсенева А. П.** Введение в донозологическую диагностику. М.: Слово, 2008.
15. **Прилуцкий Д. А., Кузнецов А. А., Плеханов А. А.** Накопитель ЭКГ «AnnA Flash 2000» // Методы и средства измерений физических величин: Матер. XIV Всерос. науч.-техн. конф. Н. Новгород: НГТУ, 2006. С. 31.
16. **Medical Computer Systems** [Официальный сайт]. <http://www.mks.ru> (дата обращения 18.05.2012).
17. **Инструментальные** методы исследования сердечно-сосудистой системы: Справочник / Под ред. Т. С. Виноградовой. М.: Медицина, 1986.
18. **Кузнецов А. А.** Методы анализа и обработки электрокардиографических сигналов: Новые подходы к выделению информации: монография. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008.
19. **Кузнецов А. А.** Применение метода оценки вариабельности сердечного ритма в донозологической диагностике функционального состояния организма // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 50—55; **Kuznetsov A. A.** Application of method of estimating the variability of the heart rhythm in prenosological diagnostics of the functional state of the organism // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. N 6. P. 691—698.
20. **Владимирский Б. М.** Работы А. Л. Чижевского по солнечно-земным связям: гелиобиология в канун XXI века — итоги, проблемы, перспективы // *Биофизика*. 1998. Т. 43. Вып. 4. С. 566—570.
21. **Кузнецов А. А., Палей М. С.** Биополе как вариационный ряд форм материи // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине. Форум идей. СПб.: СПГУ, 2000.
22. **Гласс Л., Мэки М.** От часов к хаосу. М.: Мир, 1991.
23. **Pool R.** Is it healthy to be chaotic? // *Sci.* 1989. V. 243. P. 604—607.
24. **Кузнецов А. А.** Характеристики виртуальной диаграммы ритма сердца // Информационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 91—96.
25. **Кузнецов А. А.** Энтропия ритма сердца: монография. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009.
26. **Мун Ф.** Хаотические колебания. Вводный курс для научных сотрудников и инженеров. М.: Мир, 1990.
27. **Вентцель Е. С.** Теория вероятностей: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1999.
28. **Кузнецов А. А.** Критерий балансного состояния механизма регуляции ритма сердца // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 61—65; **Kuznetsov A. A.** Criterion for a balanced state of the heart rate regulating mechanism // *Measurement Techniques*. 2012. V. 55. N 1. P. 90—96.

Дата принятия 18.07.2012 г.