

Информационные технологии и системы

УДК 616.12-008.318.1

ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ РАЗБРОСА ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ ОДНОКАНАЛЬНОЙ ЭКГ

Л.С. Файнзильберг¹, Е.Н. Минина²

¹*Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН Украины и Министерства образования и науки Украины*

²*Таврический Национальный университет имени В.И. Вернадского*

Рассмотрен новый подход к оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы при скрининговых обследованиях, основанный на анализе признаков фазового портрета одноканальной ЭКГ. Исследована диагностическая ценность показателя, характеризующего разброс траекторий ЭКГ на фазовой плоскости как дополнительного критерия оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Установлены гендерные и возрастные особенности этого показателя в покое и под нагрузкой.

Розглянуто новий підхід до оцінки функціонального стану серцево-судинної системи при скринінгових обстеженнях, заснований на аналізі ознак фазового портрету одноканальної ЕКГ. Досліджено діагностичну цінність показника, що характеризує розкид траєкторій ЕКГ на фазовій площині, як додаткового критерію оцінки функціонального стану серцево-судинної системи. Встановлено гендерні та вікові особливості цього показника у спокої та під навантаженням.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие средств вычислительной техники и информационных технологий положило основу новой отрасли — компьютерной электрокардиографии. Цифровые электрокардиографы в медицинской практике прошли несколько стадий своего развития. Первые изделия имели лишь одну, но очень важную функцию регистрации, отображения и хранения ЭКГ в цифровой форме. Второе поколение обеспечивало уже возможность автоматического распознавания информативных фрагментов ЭКГ (зубцов P , Q , R , S , T) и измерение традиционных электрокардиографических признаков. Затем появились цифровые электрокардиографы, в которых были встроены алгоритмы поддержки принятия решений врача-кардиолога, основанные на предшествующем многолетнем опыте визуальной интерпретации ЭКГ во временной области.

Безусловно применение таких изделий в амбулаторной и клинической практике облегчает труд медицинского персонала и сокращает время

© Л.С. Файнзильберг, Е.Н. Минина, 2013

ISSN 0452-9910. Кибернетика и вычисл. техника. 2014. Вып. 175

получения результата диагностики. Однако компьютерная реализация *традиционных подходов* к обработке ЭКГ во временной области не обеспечила достижение главной цели — повышение достоверности результатов диагностики. Более того, опытные клиницисты часто по-прежнему предпочитали визуальную интерпретацию ЭКГ, не полностью доверяя компьютерным алгоритмам, которые, вследствие сложности реальных сигналов, иногда приводят к ошибкам еще на стадии измерения амплитудно-временных параметров.

Ситуация кардинально изменилась с появлением новых подходов к анализу и интерпретации ЭКГ, которые принципиально не могут быть реализованы без компьютерной обработки. Оказалось, что дополнительную диагностическую информацию можно получить при обработке ЭКГ в частотной области с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье и метода вейвлет-преобразований [1], с помощью которого удается обнаруживать тонкие изменения сигнала, в частности так называемые поздние потенциалы желудочков, которые невидимы на обычной ЭКГ. Получили известность также компьютерные алгоритмы, основанные на оценке предикторов внезапной сердечной смерти, таких как электрическая альтернация сердца [2] и турбулентность сердечного ритма [3].

Оригинальный подход к компьютерному анализу и интерпретации ЭКГ разработан в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины и реализован в аппаратно-программном комплексе ФАЗАГРАФ[®], который выпускается серийно. Этот подход основан на переходе от скалярного представления ЭКГ $z(t)$, регистрируемой во временной области, к векторному представлению в виде фазового портрета в координатах $z(t), \dot{z}(t)$, где $\dot{z}(t)$ — первая производная сигнала об электрической активности сердца [4].

Эффективность этого подхода при скрининге ишемической болезни сердца подтверждена многочисленными испытаниями, обобщенные результаты которых представлены в работе [5]. Клинические испытания подтвердили, что за счет использования дополнительного диагностического признака β_T , характеризующего симметрию фрагмента реполяризации усредненной фазовой траектории, удается повысить чувствительность и специфичность ЭКГ-диагностики при обработке сигнала одного отведения (первого стандартного) даже в тех случаях, когда традиционный анализ ЭКГ в 12 отведениях оказывается неинформативным [6].

Установлено, что анализ показателя β_T позволяет проводить оценку функциональных резервов миокарда [7]. Оказалось, что дополнительную диагностическую информацию несут и другие признаки фазового портрета ЭКГ, такие как угол α ориентации фазового портрета и параметр S_{TR} , характеризующий соотношение площадей петель зубца T и комплекса QRS на фазовой плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ [8].

В работе [9] впервые было описано еще одно свойство фазового портрета одноканальной ЭКГ. Обнаружено, что под действием физических нагрузок увеличивается *область рассеивания* точек фазового портрета, которая

уменьшается после прекращения нагрузки, причем время «восстановления» фазового портрета зависит от степени тренированности испытуемого.

Цель настоящей статьи – дальнейшие исследования, направленные на изучение диагностической ценности параметра, характеризующего величину разброса фазовых траекторий ЭКГ первого стандартного отведения при оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы у контингентов с различным уровнем адаптационного потенциала.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ЭКГ

Исследования проводились с использованием аппаратно-программного комплекса ФАЗАГРАФ[®], реализующего информационную технологию обработки ЭКГ первого стандартного отведения на фазовой плоскости.

В отличие от большинства известных работ [10], в которых фазовый портрет одноканальной ЭКГ изучается на плоскости $z(t), z(t - \tau)$, где $\tau = \text{const}$ — временная задержка, в комплексе ФАЗАГРАФ[®] реализованы процедура построения фазового портрета в координатах $z(t), \dot{z}(t)$, где $\dot{z}(t)$ — скорость изменения сигнала об электрической активности сердца в момент времени t . За счет этого учитываются не только амплитудные, но скоростные характеристики исследуемого процесса, на ценность которых указывалось в работах кардиологов [11–13].

Отображение ЭКГ в координатах $z(t), \dot{z}(t)$ можно пояснить как графоаналитический метод исследования динамической системы, состояние которой описывается двумя дифференциальными уравнениями

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = F(x_1, x_2), \quad (2)$$

где $x_1 = z(t)$ — выходная координата системы, в данном случае — амплитуда ЭКГ, измеренная в момент времени t , $x_2 = \dot{z}(t)$ — ее первая производная, а $F(x_1, x_2)$ — некоторая нелинейная функция.

Разделив (2) на (1), получим уравнение, в котором отсутствует время t в явном виде:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{F(x_1, x_2)}{x_2}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3)

$$x_2 = \Psi(x_1) \quad (4)$$

с учетом обозначений $x_1 = z(t)$ и $x_2 = \dot{z}(t)$ можно представить в виде зависимости

$$\dot{z}(t) = \Psi(z(t)), \quad (5)$$

которая определяет фазовую траекторию на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$. Циклический характер функции $x_1 = z(t)$ предопределяет форму фазового

портрета ЭКГ на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ — аттрактора в виде предельного цикла.

В том же случае, когда размерность фазового пространства $N > 2$ траекторию (5) можно интерпретировать как проекцию многомерного фазового портрета на плоскость $z(t), \dot{z}(t)$. Напомним, что в диссипативных системах с размерностью фазового пространства $N \geq 3$ возможен режим сложных непериодических пульсаций с появлением хаотического (странного) аттрактора [14].

Поскольку неизвестны аналитические выражения функций $x_1 = z(t)$ и $F(\cdot)$ будем строить фазовый портрет ЭКГ экспериментально, используя цифровую последовательность $z(t_k)$ дискретных значений наблюдаемого сигнала в моменты времени $t_k \equiv k\Delta$, $k = 0, 1, \dots, K-1$, где Δ — шаг квантования.

После предварительной обработки массива дискретных значений $z(t_k)$ (удаления дрейфа изоэлектрической линии, частотно-избирательной фильтрации и адаптивного сглаживания) удастся на основе процедуры численного дифференцирования с соответствующей процедурой регуляризации получать приемлемую оценку производных $\dot{z}(t_k)$ сигнала в дискретные моменты времени t_k [15, с. 157–160]. В результате формируется последовательность двумерных векторов (точек)

$$(z(t_0), \dot{z}(t_0)), (z(t_1), \dot{z}(t_1)), \dots, (z(t_{K-1}), \dot{z}(t_{K-1}))), \quad (6)$$

лежащих на фазовой плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ (рис. 1).

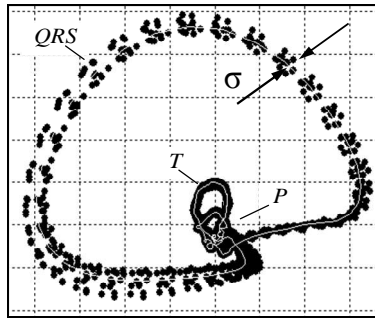


Рис. 1. Фазовый портрет ЭКГ на плоскости $z(t), \dot{z}(t)$ в виде периодического аттрактора

Фазовый портрет ЭКГ, подобно векторкардиограмме, содержит петли зубцов P , T и комплекса QRS (рис. 1), но, в отличие от традиционной векторкардиограммы, может быть построен по сигналу *одного отведения*, например первого стандартного отведения. Оригинальные компьютерные алгоритмы обработки ЭКГ, в том числе процедура оценки параметра σ , характеризующего величину разброса фазовых траекторий ЭКГ (рис. 1), описаны в работе [16].

БАЗОВЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ГИПОТЕЗЫ

Многочисленные наблюдения позволили обнаружить следующие свойства фазовых портретов ЭКГ:

1. В состоянии покоя у одного и того же испытуемого наблюдалась различная степень рассеивания точек фазового портрета (рис. 2): по сравнению с типичной формой периодического аттрактора (рис. 2, *а*) при субъективных жалобах пациента на усталость и дискомфорт в грудной клетке чаще всего наблюдалось увеличение величины разброса фазовых траекторий (рис. 2, *б*), расщепление («раздвоение») аттрактора (рис. 2, *в*) и даже переход от периодического к хаотическому (странному) аттрактору (рис. 2, *г*), что вызывало адекватные изменения значений параметра σ .

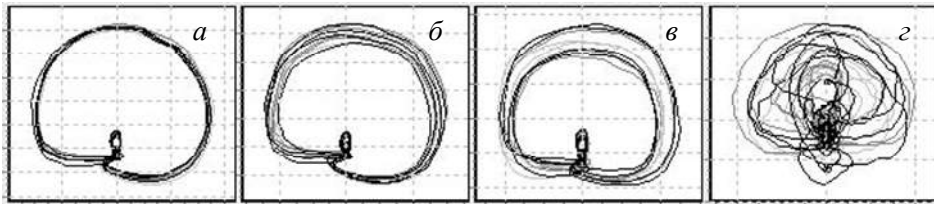


Рис. 2. Примеры фазовых портретов ЭКГ испытуемого Л. в покое

2. В процессе физических нагрузок (рис. 3) величина разброса фазовых траекторий увеличивалась, причем по сравнению с исходным состоянием (рис. 3, *а*) на высоте нагрузки (рис. 3, *б*) приращение параметра было тем больше, чем менее тренирован испытуемый. У нетренированных испытуемых увеличивалось также время реституции, необходимое для восстановления исходной формы фазового портрета (рис. 3, *в*).

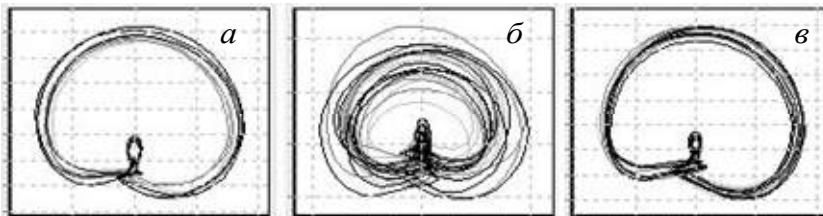


Рис. 3. Динамика изменения фазового портрета испытуемого Л. под нагрузкой: *а* — исходное состояние; *б* — на высоте нагрузки 150 Вт; *в* — после отдыха 15 минут

Эксперименты, проведенные с использованием генеративной модели порождения искусственной ЭКГ реалистической формы [4, с. 121], показали:

а) увеличение дисперсии параметров зубцов P , Q , R , S , T на последовательных сердечных циклах приводит к увеличению значений параметра σ (в частности, при увеличении дисперсии D_T амплитудно-временных параметров, характеризующих форму зубца T , увеличивается степень рассеивания точек соответствующей петли фазового портрета (рис. 4);

б) альтернация элементов ЭКГ, в частности чередование зубцов R с различной амплитудой на последовательных циклах, приводит к характерному раздвоению фазового портрета (рис. 2, *в*);

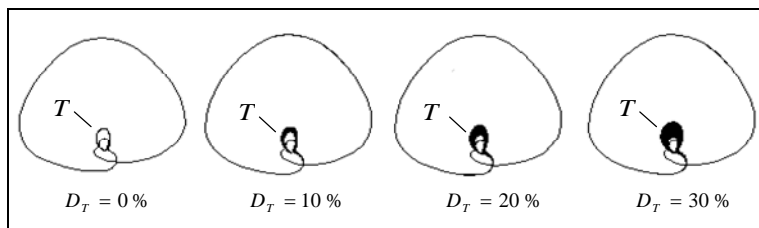


Рис. 4. Модельные эксперименты при различной дисперсии D_T амплитудно-временных параметров зубца T

в) при значительных вариациях амплитудно-временных параметров сердечных циклов, вызванных внутренними и внешними возмущениями, форма фазового портрета ЭКГ внешне напоминает странный аттрактор (рис. 5).

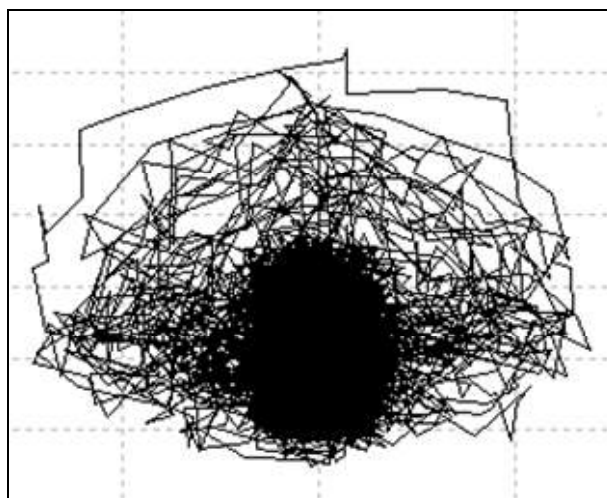


Рис. 5. Форма фазового портрета ЭКГ при высоком уровне внутренних и внешних возмущений

Возникает естественные вопрос: какие предпосылки могут лежать в основе наблюдаемого разброса фазовых траекторий реальных записей одноканальной ЭКГ и диагностической ценности параметра σ ?

Известно [17, 18], что организм человека, представляя собой открытую нелинейную диссипативную систему, обменивается с окружающей средой веществом, энергией и информацией. При этом адаптационные возможности организма реализуются путем включения и постоянного использования двух механизмов: гомеостатических, обеспечивающих достижение и поддержание стационарных (оптимальных) состояний, и хаотических (детерминированных или стохастических), которые ориентированы на включение механизмов самоорганизации и развития [19].

Оптимальное сочетание этих двух механизмов с учетом возрастного развития обеспечивают приспособительные процессы, а их согласованное взаимодействие является важнейшим признаком универсальной эволюционно обусловленной системной организации [20].

Как отмечают авторы работы [21], при исследовании биоэлектрической активности организма человека и животных было обнаружено изменение

степени «сложности» и «хаотичности» сигналов (ЭЭГ и ЭКГ) при возникновении патологии. С другой стороны, при многих патологических состояниях проявляется четко выраженная периодичность, сопровождающаяся потерей изменчивости и снижением хаотического компонента. Л. Гласс и М. Мэки ввели в науку термин «динамическая болезнь», характеризуя им именно возникновение аномалии во временных зависимостях переменных состояний, описывающих режимы функционирования живых систем. При этом необходимо различать анализ варибельности периодических компонентов стационарных режимов функционирования, связанных с временными показателями, и анализ хаотических колебаний, присущих переходным состояниям и не зависящих от времени.

Согласно [14, 20] важная задача научных исследований — установить некоторую «норму хаотичности» и ее отклонения под влиянием тех или иных воздействий. При этом следует учитывать, что не всегда уменьшение степени хаотичности означает наличие процессов самоорганизации и наоборот — увеличение степени хаотичности означает наличие деградации.

Таким образом, «параметры хаоса» могут служить устойчивой и показательной оценкой функционального состояния [19, 20] и эффективности его управления. Известно также, что нервные механизмы, управляющие сердечным ритмом, по своей сути, относятся к хаотическим, что придает системе возможность работать в более широком адаптационном коридоре [18].

Подобно тому, как степень хаотичности состояния термодинамической системы любой физической природы характеризуется «размытостью» фазового портрета и увеличением его эффективного объема величина разброса фазовых траекторий ЭКГ может характеризовать хаотичность механизмов сердечной деятельности и давать дополнительную информацию для оценки оптимальности управления ее функциональным состоянием.

Вполне понятно, что разброс фазовых траекторий, связанный с изменчивостью формы сигнала $z(t)$ на последовательных сердечных циклах ЭКГ, может быть обусловлен как чисто стохастическими процессами, так и механизмом детерминированного хаоса. К тому же, в соответствии с [22], хаотическое поведение реальной нелинейной динамической системы во многом обязано своим возникновением наличием не только детерминистских законов, но и случайных факторов. Более того, согласно результатам последних исследований, опубликованных в [23], невозможно по наблюдаемому сигналу однозначно определить является ли он детерминированным хаосом или же случайным процессом, поскольку оба эти механизма могут порождать практически одинаковые сигналы.

Поэтому для оценки эффективности управления функциональным состоянием сердечно-сосудистой системы, основанной на измерении величины разброса фазовых траектории ЭКГ на плоскости $z(t)$, $\dot{z}(t)$, нас будет интересовать не «этиология» происхождения хаотичности фазового портрета, а степень хаотичности, выраженная значениями параметра σ .

При значительном увеличении параметра σ фазовый портрет ЭКГ

теряет фрактальную структуру, обеспечивающую функциональную память и способность к оптимальной поисковой активности систем организма, что свидетельствует об ограниченности коридора адаптации и снижении эффективности управления. Поэтому можно предположить, что степень разброса траекторий фазового портрета, количественно выраженная диапазоном изменений параметра σ , может быть предиктором адекватности «степени хаотичности» функционирования системы с учетом ее уровня развития, гендерных и индивидуальных особенностей организма.

Разумеется в соответствии с современными представлениями о доказательной медицине все сформулированные выше гипотезы потребовали проверки на различных группах верифицированных испытуемых, задачами которых было:

1) выявить особенности параметра σ в покое и при увеличении внешней нагрузки у контингентов разного пола и возраста и с различным уровнем функциональных резервов кардиогемодинамики;

2) определить направленность изменения параметра σ при увеличении эффективности управления функциональным состоянием;

3) выявить диагностическую значимость параметра в оценке функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

КЛИНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения сформулированных задач было обследовано 321 человек (129 женщин и 192 мужчин) в возрасте от 6 до 76 лет. Среди обследованных было:

- 176 человек не занимающихся спортом в разных возрастных группах,
- 65 спортсменов высокой квалификации (37 футболистов, 20 боксеров, 8 борцов),
- 30 кардиологических больных с острой патологией,
- 50 кардиологических больных с хронической патологией.

Обработка экспериментальных данных проводилась с помощью пакета STATISTICA-6.0. Оценки расхождения распределений признаков проводились с помощью критерия согласия Колмогорова — Смирнова. Для оценки взаимосвязи между исследуемыми признаками применяли критерий ранговой корреляции Спирмена. Анализ различий выраженности признаков между исследуемыми группами проводили с помощью критерия Манна — Уитни.

Установлено (рис. 6), что с увеличением возраста и проявлением возрастных изменений показатель σ в покое у женщин имеет тенденцию к увеличению, а у мужчин — к уменьшению, причем изменения σ относительно средних значений достигают 15 % ($p < 0,05$). При этом гендерные особенности показателя σ усиливаются с увеличением возраста: у пожилых людей зафиксированы достоверные различия ($p < 0,05$) разброса фазовых траекторий ЭКГ мужчин и женщин. Вероятно, возрастные изменения организма мужчин и женщин разнонаправленно включают адаптационные и компенсаторные механизмы.

Примечательно, что независимо от пола у детей до 12 лет наблюдается более широкий диапазон σ , в среднем на 22,5 % ($p < 0,05$) превышающий показатели взрослого человека (рис. 6). По-видимому, высокая степень разброса фазовых траекторий у детей до 12 лет обусловлена преобладанием процессов самоорганизации в развивающемся детском организме, что не является проявлением патологии.

Для выявления особенностей изменения показателя σ под действием ступенчато возрастающей нагрузки (50, 100, 150 Вт) изучали динамику разброса фазовых траекторий портрета ЭКГ у спортсменов высокой квалификации и у лиц, не занимающихся спортом. В эксперименте принимало участие 70 мужчин в возрасте 19–25 лет (35 спортсменов и 35 человек не занимающихся спортом).

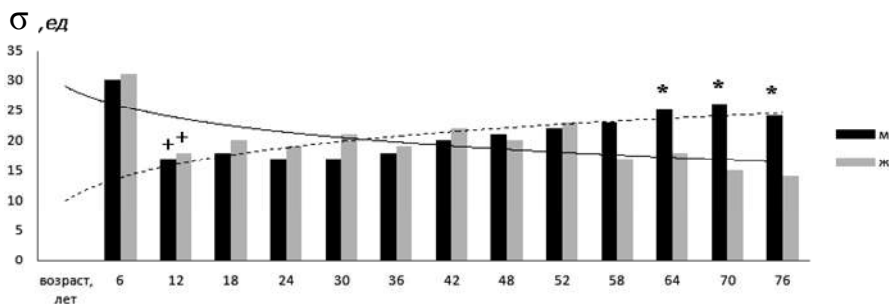


Рис. 6. Возрастные особенности величины разброса фазовых траекторий (показателя σ): + — достоверные различия ($p < 0,05$) относительно предыдущей возрастной группы; * — достоверные гендерные различия ($p < 0,05$) в возрастной группе (по критерию Манна — Уитни)

Установлено, что при нарастании нагрузки у спортсменов наблюдалось «волнообразное» изменение средних значений параметра σ , в то время как у лиц, не занимающихся спортом, параметр σ увеличивался более-менее монотонно (рис. 7). Можно предположить, что немонотонный характер изменений величины разброса фазовых траекторий ЭКГ у спортсменов под нагрузкой обусловлен тем, что в тренированном организме с более «обученной» и совершенной системой регуляции кардиогемодинамики происходит поочередное вовлечение как хронотропного механизма, так и поисковых механизмов управления. Другими словами, в процессе систематических физических тренировок сердечно-сосудистая система спортсмена «обучается» выбирать более эффективные методы управления, что свидетельствует о расширении резервов адаптации в обеспечении высокого уровня работоспособности.

Для анализа адаптационных резервов мужчин и женщин молодого возраста (от 19 до 25 лет) оценивался нормированный показатель

$$\eta = \frac{P}{\sigma}, \quad (7)$$

представляющий собой отношение частоты сердечных сокращений P к величине разброса фазовых траекторий σ . Эксперименты, проведенные при

выполнении нагрузочного теста и в восстановительный период (на шестой минуте отдыха), показали (рис. 8) следующее:

а) при увеличении внешней нагрузки у мужчин-спортсменов наблюдается снижение нормированного показателя η , а это значит, что прирост показателя σ , характеризующего разброс фазовых траекторий, превышает прирост частоты сердечных сокращений P ;

б) у женщин-спортсменок наблюдается противоположная тенденция динамики нормированного показателя η , т.е. у этой категории испытуемых прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ ;

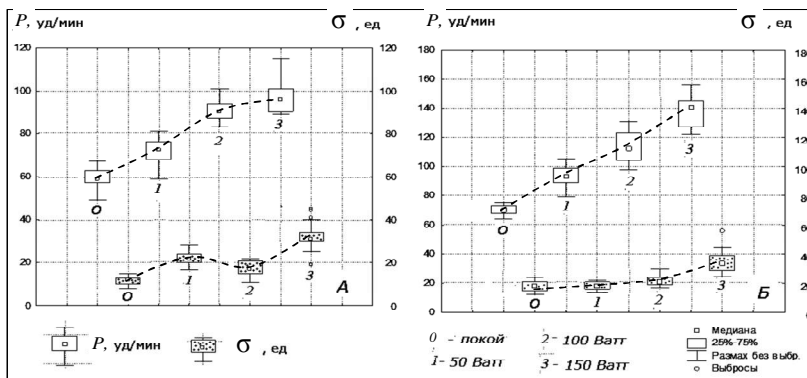


Рис. 7. Особенности роста частоты сердечных сокращений (P , уд/мин) и величины разброса фазовых траекторий (σ , ед.) в группах спортсменов (А) и лиц, не занимающихся спортом (Б)

в) при увеличении внешней нагрузки у лиц, которые не занимаются спортом, независимо от их пола прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ ;

г) не зависимо от уровня тренированности у мужчин и у женщин наблюдались существенные различия ($p < 0,05$) средних значений нормированного показателя η на шестой минуте отдыха. Это означает, что восстановительный период у мужчин и женщин протекает по-разному: у мужчин наблюдается более интенсивное восстановление частоты сердечных сокращений P при незначительном снижении показателя σ , тогда как в женском организме восстановительный период сопровождался более быстрым снижением показателя σ по сравнению с восстановлением частоты сердечных сокращений.

Обнаруженная полярная особенность восстановления мужского и женского организма по нормированному показателю η еще раз подтверждает различие послестрессовых состояний мужского и женского организма, которые автор работы [14] поясняет тем, что у женщин более выражен процесс самоорганизации (самовосстановления) за счет перехода от хаотического состояния к более упорядоченному, в то время как у мужчин наблюдается обратная динамика — самовосстановление сопровождается увеличением степени хаотичности.

На основе экспериментальных данных, полученных для контингентов с

различным уровнем адаптационного потенциала, проводилась оценка взаимосвязи показателя σ с традиционными параметрами variability сердечного ритма. В табл. 1 представлены результаты оценки парных корреляций показателя σ с амплитудой моды AMo , стандартным отклонением $SDNN$ и мощностью высокочастотных компонентов HF массива нормальных $R-R$ интервалов сердечного ритма.

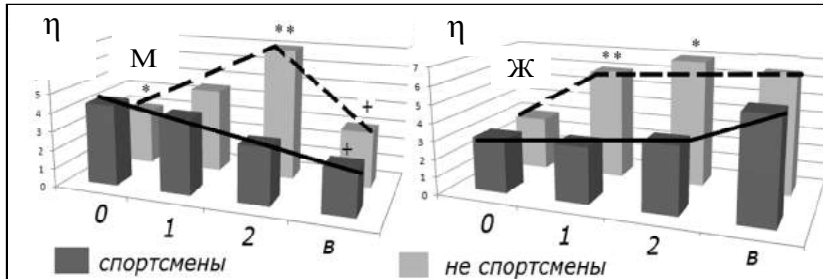


Рис.8. Особенности динамики нормированного показателя η при выполнении нагрузочного теста (М – мужчины, Ж – женщины): 0 — покой, 1 — нагрузка 100 Вт, 2 — нагрузка 200 Вт; в — восстановительный период на 6-й минуте отдыха; + — достоверные гендерные различия ($p < 0,05$); * — достоверные внутригрупповые различия между спортсменами и неспортсменами ($p < 0,05$)

Таблица 1

Корреляционные взаимосвязи показателя σ с параметрами сердечного ритма в группах с разным уровнем адаптационного потенциала

Условия адаптации	Контингент	Среднее значение показателя σ	Корреляционные взаимосвязи		
			$\sigma - AMo$	$\sigma - SDNN$	$\sigma - HF$
Успешная адаптация	Спортсмены в соревновательный период ($n = 38$)	15	-0,60**	0,67***	-0,59**
Срыв адаптации	Кардиологические больные с острой патологией ($n = 30$)	11°	-0,63***	0,72***	0,66***
Послестрессовая компенсация	Кардиологические больные с хронической патологией ($n = 50$)	29°°	-0,60*	0,61*	—

Примечание: * — ($p < 0,05$); ** — ($p < 0,01$); *** — ($p < 0,001$) — достоверность взаимосвязей между показателями по критерию Спирмена.

Полученные результаты показывают, что величина разброса фазовых траекторий, которая отражает функциональное состояние сердечно-сосудистой системы, проявляется разнонаправленными корреляционными взаимосвязями с высокочастотными компонентами регуляции сердечного ритма, характеризующими суммарный эффект вегетативной регуляции. Так, у спортсменов в соревновательный период стрессопротекторное влияние парасимпатической части нервной системы характеризовалось

отрицательными корреляционными зависимостями с показателем σ , а у пациентов с кардиологической патологией — прямой зависимостью.

На рис. 9 представлены гистограммы, которые дают представление об условных распределениях значений показателя σ , вычисленного по ЭКГ покоя в группе больных с острыми и хроническими сердечно-сосудистыми патологиями (83 мужчины и женщины) и в группе условно здоровых волонтеров (150 человек разного пола).

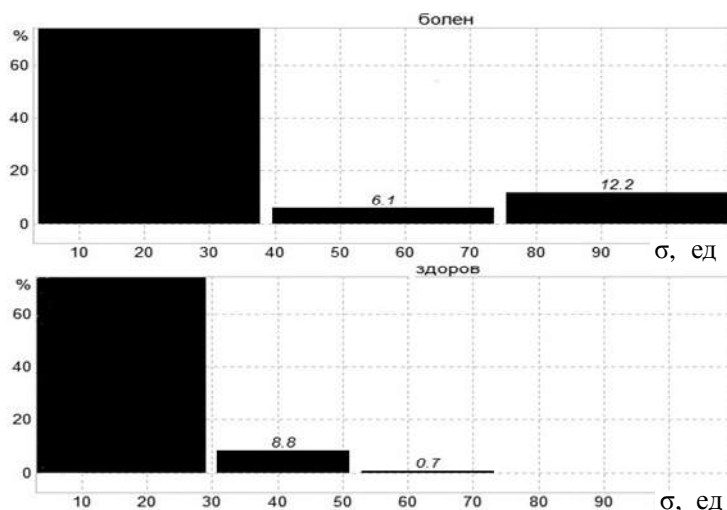


Рис. 9. Оценка условных распределений параметра σ в группах больных (сверху) и здоровых (внизу)

Легко видно, что при значениях $\sigma \geq 50$ у.е. даже по одному показателю σ можно принимать достаточно обоснованные решения об указанных группах (табл. 2).

В то же время при $\sigma < 30$ у.е. по значениям только одного параметра σ невозможно отличить представителей указанных групп. Тем не менее в соответствии с результатами теоретических исследований, представленных в [24], неинформативный сам по себе диагностический признак при определенных условиях может оказаться полезным в совокупности с другими признаками и даже обеспечить безошибочную классификацию. Этот результат дает основание предполагать, что даже в области $\sigma < 30$ показатель σ может нести дополнительную диагностическую ценность совместно с другими параметрами ЭКГ, в частности с параметром β_T [5, 7], характеризующим симметрию участка реполяризации, и углом α [8], несущим информацию об ориентации фазового портрета. Экспериментальная проверка такой гипотезы составит предмет наших дальнейших исследований.

Таблица 2

Схема принятия решений при значениях показателя $\sigma \geq 50$

Значения показателя σ , у.е.	Решение
$\sigma > 75$	Высокий риск патологии
$50 < \sigma \leq 75$	Низкий риск патологии

Выводы

Проведенные исследования показали, что величина разброса фазовых траекторий ЭКГ, регистрируемой даже в одном (первом стандартном) отведении, несет дополнительную диагностическую информацию об уровне адаптационных резервов организма и может быть количественно выражена показателем σ .

Обработка экспериментальных данных, полученных для испытуемых в возрасте от 6 до 76 лет с различным уровнем адаптационного потенциала (65 спортсменов высокой квалификации, 176 условно здоровых волонтеров, не занимающиеся спортом, и 80 больных с острой и хронической сердечной патологией) позволили установить следующие особенности показателя σ :

1. С увеличением возраста показатель σ в покое у женщин имеет тенденцию к увеличению, у мужчин — к уменьшению, а его изменения относительно средних значений достигают 15 % ($p < 0,05$).

2. Независимо от пола у детей до 12 лет наблюдается более широкий диапазон σ , в среднем на 22,5 % ($p < 0,05$) превышающий показатели взрослого человека, что вероятнее всего обусловлено преобладанием процессов самоорганизации в развивающемся детском организме.

3. При нарастании нагрузки у спортсменов наблюдается «волнообразное» изменение средних значений параметра σ , в то время как у лиц, не занимающихся спортом, параметр σ увеличивался монотонно. Можно предположить, что немонотонный характер изменений величины разброса фазовых траекторий ЭКГ у тренированных людей обусловлен более совершенной системой регуляции кардиогемодинамики, которая поочередно вовлекает как хронотропные, так и поисковые механизмы управления.

4. При увеличении внешней нагрузки у мужчин-спортсменов прирост показателя σ , характеризующего разброс фазовых траекторий, превышает прирост частоты сердечных сокращений P , а у женщин-спортсменок наблюдается противоположная тенденция.

5. При увеличении внешней нагрузки у лиц, которые не занимаются спортом, независимо от их пола, прирост частоты сердечных сокращений P превышает прирост показателя σ .

6. Количественных изменений показателя σ как при срочной, так и при долговременной адаптации или ее срыве напрямую связан с оптимальным включением высокочастотных компонентов регуляции сердечного ритма.

7. Величина разброса фазовых траекторий одноканальной ЭКГ, характеризуемая показателем σ , может быть использована в качестве дополнительного критерия оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы.

1. Subramanian A.S., Gurusamy G. Detection of ventricular late potentials using wavelet-neural approach. *European Journal of Scientific Research*, 2011, vol. 58, no. 1, pp.11–20.
2. Nearing B.D., Verrier R.L. Modified moving average analysis of T-wave alternans to predict ventricular fibrillation with high accuracy. *Journal of Applied Physiology*, 2002, vol. 92, pp. 541–549.

3. Турбулентность сердечного ритма в оценке риска внезапной сердечной смерти / Е.В. Шляхто, Э.Р. Бернгардт, Е.В. Пармон, А.А. Цветникова // Вестник аритмологии. — 2004. — № 38. — С. 49–55.
Shliachto E.V., Berngardt E.R., Parmon E.V., Tsvetnikova A.A. Turbulence of cardiac rhythm as indicator of sudden cardiac death risk. *Herald of arrhythmology*, 2004, no. 38, pp. 49–55.
4. Файнзильберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы / Л.С. Файнзильберг. — К.: Освита Украины, 2013. — 191 с.
Fainzilberg L.S. *Electrocardiogram phase portraits in computer diagnostics*. Kiev: Osvita Ukrainy, 2013. 191 p.
5. Файнзильберг Л.С. ФАЗАГРАФ® — эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца / Л.С. Файнзильберг // Клиническая информатика и телемедицина. — 2010. — Т. 6. — Вып. 7. — С. 22–30.
Fainzilberg L.S. FASEGRAPH® — effective ECG processing technology for the coronary heart disease screening. *Clinical informatics and telemedicine*, 2010, vol. 6, issue 7, pp. 22–30.
6. Гриценко В.И. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы / В.И.Гриценко, Л.С. Файнзильберг // Врач и информационные технологии. — 2013. — № 3. — С.52–63.
Gritsenko V.I., Fainzilberg L.S. Information technology FASEGRAPH® for integrated assessment of cardiovascular system using phase portrait of electrocardiogram. *Physician and information technology*, 2013, no. 3, pp. 52–63.
7. Минина Е.Н. Анализ волны Т ЭКГ в фазовом пространстве в определении функциональных резервов миокарда / Е.Н. Минина // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. — 2013. — Т. 26 (65). — № 2. — С. 148–153.
Minina E.N. The phase-space analysis of the T-wave on the ECG phase portrait and myocardium functional capacities assessment. *Scientific notes of the Tavrida National University of Vernadsky*, 2013, vol. 26 (65), pp. 148–153.
8. Файнзильберг Л.С. Исследование диагностической ценности угла ориентации фазового портрета одноканальной ЭКГ как индикатора функционального состояния миокарда // Л.С. Файнзильберг, Е.Н. Минина // Клиническая информатика и телемедицина. — 2013. — Т. 9. — Вып. 10. — С. 33–42.
Fainzilberg L.S., Minina E.N. Study of the diagnostic value of the orientation angle of the phase portrait of the one-lead ECG as an indicator of the functional state of the myocardium. *Clinical informatics and telemedicine*, 2013, vol. 9, issue 10, pp. 33–42.
9. Fainzilberg L.S., Potapova T.P. Computer Analysis and Recognition of Cognitive Phase Space Electro-Cardio Graphic Image. *Proceeding of the 6th International Conference On Computer analysis of Images and Patterns (CAIP'95)*. Prague (Czech Republic), 1995, pp. 668–673.
10. Фрумин Л.Л. О фазовом портрете электрокардиограммы / Л.Л. Фрумин, М.Б. Штарк // Автотриметрия. — 1993. — № 2. — С. 51–54.
Frumin L.L., Shtark M.B. On the ECG phase portrait. *Avtometriya*, 1993, no 2, pp. 51–54.
11. Шилинская З.И. Дифференцирование электрической активности сердца / З.И. Шилинская // Кардиология. — 1965. — № 3. — С. 67–72.
Shilinskaite Z.I. Shilinskaite Cardiac electrical activity differentiation. *Cardiology*, 1965, no. 3, pp. 67–72.
12. Халфен Э.Ш. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца Т ЭКГ/ Э.Ш. Халфен, Л.С. Сулковская // Кардиология. — 1986. — № 6. — С. 60–62.
Halfen E.S., Sulkovskaya L.S. Clinical importance of T — wave velocity indicator in ECG records. *Cardiology*, 1986, no. 6, pp. 60–62.
13. Волкова Э.Г. Диагностические возможности первой производной ЭКГ в оценке состояния коронарной артерии у больных ишемической болезнью сердца / Э.Г. Волкова, О.Ф. Калаев, А.Р. Ковынев // Терапевтический архив. — 1990. — № 3. — С. 35–38.
Volkova E.G., Kalaev O.F., Kovynev A.R. Diagnostic capabilities of the first ECG derivative in the assessment of ischaemia patients' coronary artery. *Therapeutic Archives*,

- 1990, no. 3, pp. 35–38.
14. Анищенко В.С. Детерминированный хаос / В.С. Анищенко. — [Электронный ресурс] — Режим доступа: http://kirsoft.com.ru/freedom/KSNews_380.htm (дата обращения: 20.11.2013).
Anishchenko V.S. *Deterministic chaos*. Available at: http://kirsoft.com.ru/freedom/KSNews_380.htm (accessed 20 November 2013).
 15. Файнзильберг Л.С. Информационные технологии обработки сигналов сложной формы. Теория и практика / Л.С. Файнзильберг. — К. : Наукова Думка, 2008. — 333 с.
Fainzilberg L.S. *Information processing technologies for the irregular shape signals. Theory and practical applications*. Kiev: Naukova Dumka, 2008. 333 p.
 16. Файнзильберг Л.С. Компьютерный анализ и интерпретация электрокардиограмм в фазовом пространстве / Л.С. Файнзильберг // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2004. — № 1. — С. 32–46.
Fainzilberg L.S. Computer analysis and ECG interpretation in the phase space. *System Research & Information Technologies*, 2004, no. 1, pp. 32–46.
 17. Блюменфельд Л.А. Термодинамика, информация и конструкция биологических систем / Л.А. Блюменфельд // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 7. — С. 88–92.
Blyumenfeld L.A. Thermodynamics, information and design of biological. *Soros Educational Journal*, 1996, no. 7, pp. 88–92.
 18. Яшин А. А. Живая материя. Физика живого и эволюционных процессов / А. А. Яшин. — М. : ЛКИ, 2010. — 264 с.
Yashin A.A. *Living matter. Physics of the Alive and evolutionary processes*. Moscow: LKI, 2010. 264 p.
 19. Климонтович Ю. Л. Статистическая теория открытых систем (в 3-х томах). Том.1 / Ю.Л. Климонтович. — М.: Янус-К, 1995. — 624 с.
Klimontovich Yu.L. *Statistical theory of open systems*. Vol. 1. Moscow: Yanys-K, 1995. 624 p.
 20. Хадарцев А.А. Фундаментальные исследования по биоинформатике в развитии альтернативной медицины / А.А. Хадарцев, А.А. Яшин // Фундаментальные науки и альтернативная медицина: Тезисы докладов I Межд. симпозиума (22-25/IX 1997, Пушкино). — Пушкино: Изд-во Пушкинск. науч. Центра РАН, 1997. — С. 109.
Nadarcev A.A., Yashin A.A. Fundamental research in bioinformatics in the development of alternative. Basic Science and Alternative Medicine: *Tez. of the reports. I Int. symposium. (22-25/IX 1997, Pyshino)*. Pyshino: Pushisk. naech. Centra RAN Publ. 1997. P. 109.
 21. Майоров О.Ю. Повышение надежности исследований детерминированного хаоса в биоэлектрической активности (ЭЭГ, ЭКГ и вариабельности сердечного ритма) методами нелинейного анализа / О.Ю. Майоров, В.Н. Фенченко // Клиническая информатика и телемедицина. — 2009. — Т. 5. — Вып. 6. — С. 10–17.
Mayorov O.Yu., Fenchenko V.N. Improving the reliability studies of deterministic chaos in the bioelectric activity (EEG, ECG and heart rate variability) methods of nonlinear analysis. *Clinical informatics and telemedicine*, 2009, vol. 5, issue 6, pp. 10–17.
 22. Шарыпов О.В. Детерминированный хаос и случайность / О.В. Шарыпов — [Электронный ресурс] — Режим доступа: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000242/> (дата обращения 20.11.2013)
Sharipov O.V. *Deterministic chaos and randomness*. Available at: <http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000242/> (accessed 20 November 2013).
 23. Werndl Ch. Are deterministic descriptions and indeterministic descriptions observationally equivalent? *Studies in history and philosophy of science. Part B: Studies in history and philosophy of modern physics*, 2009, vol. 40, issue 3, pp. 232–242.
 24. Файнзильберг Л.С. Математические методы оценки полезности диагностических признаков. / Л.С. Файнзильберг — К. : Освіта України, 2010. — 152 с.
Fainzilberg L.S. *Mathematical methods for evaluating the usefulness of diagnostic features*. Kiev: Osvita Ukraine, 2013. 191 p.

Получено 2.12.2013

L.S. Fainzilberg, E.N. Minina

EVALUATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF THE CARDIOVASCULAR SYSTEM USING MAGNITUDE VARIATION OF THE PHASE TRAJECTORIES OF SINGLE-CHANNEL ECG

Introduction: The new approach to the assessment of the functional state of the cardiovascular system during screening examinations based on the analysis of the phase portrait's features of a single-channel ECG is developed. Our previous studies have shown that using of new diagnostic features of the phase portrait single channel ECG is possible to increase the sensitivity and specificity of diagnosis even in cases where traditional analysis of 12-lead ECG is uninformative. We assume that the degree of dispersion of the phase portrait trajectories of single-channel ECG may incur an additional diagnostic value as a predictor of the adequacy of the "degree of randomness" of the functioning of the system with regard to its level of development, gender and individual characteristics of the organism.

The purpose of the article is experimental verification of this hypothesis on clinical material.

Methods: Studies were conducted using a hardware-software complex FASEGRAPH that implements information technology processing of the first standard lead of ECG on the phase plane. In contrast to well-known works, in which a single-channel ECG phase portrait is studied on a plane $z(t), z(t - \tau)$, where $\tau = \text{const}$ is a time delay, the complex constructs the phase portrait in the coordinates $z(t), \dot{z}(t)$ where $\dot{z}(t)$ is the rate of change of the signal of the electrical activity of the heart. Due to this we take into account not only the amplitude but the speed characteristics of the test process. We investigate the diagnostic value of indicator σ which characterizes the dispersion of ECG's trajectories obtained from 129 female and 192 man from 6 to 76 years old. Our goal was to study the dependence of the indicator of age and gender. A secondary objective was to compare values of indicator σ with the level of fitness.

Results: It was established that with increasing age the indicator σ tends to increase among women and to decrease among men. Indicator's changes relative to the average values was as high as 15% ($p < 0,05$). Children under 12 regardless of gender demonstrate a wide range of changes of the indicator which was an average 22.5% ($p < 0,05$) higher than the rate of an adult. By increasing the external load among male athletes the increase in the index σ exceeds the increase in heart rate. The opposite trend is observed among woman-athletes. By increasing the external load in persons who are not involved in sports, regardless of their sex an increasing of the heart rate exceeds the increase in the indicator σ . Among athletes the indicator σ changes in waves under increasing the load while in the non-sporting group the indicator σ increases monotonically. Quantitative changes of the indicator σ under urgent and long-term adaptation is directly related to the optimal switching high-frequency components of heart rate regulation.

Conclusions: The dispersion of single-channel ECG's trajectories in the phase space obtained by measuring of the indicator σ can be used as an additional criterion for evaluating the effectiveness of the management the cardiovascular system's functional state.

Key words: information technology, the phase portrait of ECG, criterion.