

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ПО СОВОКУПНОСТИ ПРИЗНАКОВ ФАЗОВОГО ПОРТРЕТА ОДНОКАНАЛЬНОЙ ЭКГ

Минина Е. Н.¹, Файнзильберг Л. С.²

Цель. Изучение диагностической ценности совокупности признаков, характеризующих фазовый портрет ЭКГ первого стандартного отведения в определении эффективности функционирования сердечно-сосудистой системы у лиц с различным уровнем адаптационного потенциала.

Материал и методы. В исследованиях принимали участие 825 человек 17-70 лет. Группа лиц с кардиологической патологией состояла из 99 человек 50-70 лет с диагнозом ИБС, ПИКС. В группу условно здоровых вошли волонтеры 17-50 лет ($n=726$), из которых 35 спортсменов-футболистов (кандидаты в мастера спорта и мастера спорта) и 15 операторов электропоездов 30-35 лет. Регистрацию и анализ ЭКГ в фазовом пространстве и определение оригинальных показателей β_T , S_{TR} , α_{QRS} и σ_{QRS} фазового портрета ЭКГ проводили с помощью диагностического комплекса ФАЗАГРАФ®.

У операторов электропоездов указанные показатели фазового портрета фиксировались до и после шестичасовой рабочей смены. У условно здоровых юношей и юношей-спортсменов дополнительно производили измерения изучаемых показателей в продолжение нагрузочного теста при ступенчато возрастающей физической нагрузке. Дополнительно с помощью комплекса ФАЗАГРАФ® определяли параметры кардиоинтервалограммы с автоматическим расчётом индекса напряжения (ИН, ед.). Предварительно в этих группах был определён показатель относительного МПК, млмин/кг.

Результаты. Диагностическая эффективность показателя β_T оценивалась площадью AUC под экспериментальной ROC-кривой. Установлено, что при раздельном пороге $\beta_{T0} \approx 0,788$ обеспечивается чувствительность $S_e = 78,8\%$ и специфичность $S_p = 80,3\%$. По результатам измерения S_{TR} , α_{QRS} , σ_{QRS} в группе здоровых волонтеров определены референтные диапазоны значений этих показателей, которые составили $110 < \alpha_{QRS} < 185$ град, $\sigma_{QRS} < 30$ у.е., $S_{TR} > 0,02$ у.е. Предложена схема принятия диагностических решений по совокупности β_T , S_{TR} , α_{QRS} и σ_{QRS} . Выявлено, что "размеры" и направление перемещения области значений пар показателей фазового портрета несут информацию о компенсаторно-приспособительных механизмах как при срочной, так и при долговременной адаптации.

Заключение. Диагностические признаки ЭКГ более выразительно проявляются при отображении сигнала в фазовых координатах $z(t)$, $z'(t)$, чем во временной области $z(t)$, а совокупность показателей фазового портрета, которые автоматически

вычисляются комплексом ФАЗАГРАФ®, позволяет расширить возможности одноканальной ЭКГ как в прогностических целях, так и для оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы при скрининговых обследованиях.

Российский кардиологический журнал 2015, 12 (128): 7–13

<http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2015-12-7-13>

Ключевые слова: ФАЗАГРАФ®, одноканальная ЭКГ, фазовый портрет ЭКГ, совокупность показателей фазового портрета одноканальной ЭКГ.

¹Таврическая академия ФГАОУ ВО Крымский Федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Республика Крым, Россия; ²Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины, Киев, Украина.

Минина Е. Н.* — к. б. н., доцент кафедры теории и методики адаптивной физической культуры, физической реабилитации и оздоровительных технологий, Файнзильберг Л. С. — доктор технических наук, г. н. с.

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author): cere-el@yandex.ua

ЭКГ — электрокардиография, ЧСС — частота сердечных сокращений, ИБС — ишемическая болезнь сердца, ПИКС — постинфарктный кардиосклероз, ROC-curve — Receiver Operating Characteristic curve, AUC — Area under ROC-curve, ЛДФ — линейная дискриминантная функция, МПК — максимальное потребление кислорода, ИН — индекс напряжения по А. Р. Баевскому, QRS — комплекс QRS, ST — сегмент ST, β_T — симметрия зубца Т, S_{TR} — отношение площадей петель Т к R, α_{QRS} — угол ориентации фазового портрета, σ_{QRS} — показатель дисперсии фазового портрета, СКО β_T — среднеквадратичное отклонение симметрии зубца Т.

Рукопись получена 14.11.2014

Рецензия получена 08.12.2014

Принята к публикации 15.12.2014

ANALYSIS OF FUNCTIONAL STATE OF CARDIOVASCULAR SYSTEM BY COLLECTION OF THE SIGNS OF PHASIC PORTRAIT IN SINGLE CHANNEL ECG

Minina E. N.¹, Faynzilberg L. S.²

Aim. To study a diagnostic value of the parameters characterizing phasic ECG portrait of the first standard lead in assessment of efficiency of cardiovascular system functioning in persons with different level of adaptation potential.

Material and methods. Totally, 825 persons participated of the age 17-70 y.o. The group with cardiovascular pathology consisted with 99 persons of 50-70 y.o. with diagnoses CHD, PICS. In almost healthy group we included volunteers 17-50 y.o. ($n=726$), of those 35 soccer players (sports mastery) and 15 train drivers of 30-35 y.o. Registration and analysis of ECG in phasic area and defining of the original parameters β_T , S_{TR} , α_{QRS} and σ_{QRS} of phasic portrait of ECG was done via diagnostic complex PHASAGRAPH®.

In train drivers the mentioned parameters of phasic portrait were recorded before and after six-hour shift. In almost healthy persons, young men and male sportsmen additionally we recorded the studied parameters continuing exercise test with gradually increasing load. Additionally, with PHASAGRAPH® we assessed the parameters of cardiointervalogram with automatic calculation of tension index (TI, u.). Before this, in all groups the parameter of relative MOC was defined, mL/min/kg.

Results. Diagnostic efficacy of β_T was assessed with AUC square under experimental ROC-curve. It was found, that in threshold $\beta_{T0} \approx 0,788$ there is sensitivity $S_e = 78,8\%$ and specificity $S_p = 80,3\%$. By the results of measurement of S_{TR} , α_{QRS} , σ_{QRS} in group of almost healthy volunteers the reference diapasons defined for these parameters,

which were $110 < \alpha_{QRS} < 185$ deg, $\sigma_{QRS} < 30$ units, $S_{TR} > 0,02$ units. The scheme invented for diagnostic conclusions with the use of collected β_T , S_{TR} , α_{QRS} and σ_{QRS} . It was found that "sizes" and direction of the motions of pairs in areas of phasic portrait bring the information on compensational-adaptational mechanisms in urgent, as in long-term adaptation.

Conclusion. Diagnostic ECG signs are more visible in the signal visualization in phasic coordinates $z(t)$, $z'(t)$, than in time zone $z(t)$, and collection of phasic parameters of the phasic portrait, that are automatically calculated by the PHASAGRAPH® complex, make it to improve the power of one-channel ECG in prognostic reasons, as for the assessment of functional condition of cardiovascular system in screenings.

Russ J Cardiol 2015, 12 (128): 7–13

<http://dx.doi.org/10.15829/1560-4071-2015-12-7-13>

Key words: PHASAGRAPH®, single-channel ECG, phasic ECG portrait, collection of parameters of phasic portrait in single channel ECG.

¹Taurida Academy V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Republic Crimea, Russia; ²International Scientific-Education Center of Information Technologies and Systems of NAN and MON of Ukraine, Kiev, Ukraine.

Электрокардиография по-прежнему остается наиболее распространенным, доступным и дешевым методом объективного обследования сердца. Однако чувствительность и специфичность обычного электрокардиографического обследования недостаточно высоки. Так, масштабные популяционные исследования Rotterdam study показали [1], что у 10-25% нефатальных инфарктов миокарда на ЭКГ не выявляется никаких изменений или же ЭКГ в дальнейшем полностью нормализуется. Известно также, что ЭКГ покоя, оцениваемая по общепринятым критериям, остается нормальной приблизительно у 50% больных с хронической ИБС, в том числе во время эпизодов дискомфорта в грудной клетке.

Анализ многочисленных отечественных и зарубежных исследований, особенно на протяжении последних 15 лет, показывает, что значительной информационной ценностью обладают скрытые составляющие электрофизиологических процессов, которые не анализируются в клинической практике, что снижает потенциальные возможности диагностических систем.

Ситуация кардинально изменяется с появлением новых подходов к анализу и интерпретации ЭКГ, которые принципиально не могут быть реализованы без компьютерной обработки [2, 3]. Оказалось, что диагностическая ценность одноканальной ЭКГ повышается благодаря оригинальному подходу к компьютерному анализу и интерпретации ЭКГ в фазовом пространстве. Данный метод разработан в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН и МОН Украины и реализованном

в аппаратно-программном комплексе ФАЗАГРАФ®, который выпускается серийно [4].

Эффективность этого подхода при скрининге ишемической болезни сердца подтверждена масштабными исследованиями, 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 традиционных отведениях оказывается неинформативным [4].

В ряде других работ также отмечается ценность анализа формы Т-зубца ЭКГ в одном отведении, хотя большинство исследователей в области электрокардиографии все же придерживаются мнения, что анализ ЭКГ только в одном отведении может использоваться лишь при мониторинге нарушений сердечного ритма. В последнее время концепция генезиса волны Т уточняется, но общепризнано, что она отражает степень неоднородности реполяризации желудочков.

Цель данного исследования — изучение диагностической ценности совокупности показателей фазового портрета ЭКГ первого стандартного отведения при оценке функционирования сердечно-сосудистой системы у лиц с различным уровнем адаптационного потенциала.

Материал и методы

В отличие от большинства известных работ, в которых фазовый портрет одноканальной ЭКГ $z(t)$ изучается на плоскости с координатами $z(t)$, $z(t-\tau)$, где τ — временная задержка, комплекс ФАЗАГРАФ® за счет использования оригинальных компьютерных алгоритмов впервые обеспечивает возможность построения фазового портрета ЭКГ в координатах $z(t)$, $z'(t)$, где $z'(t)$ — скорость изменения электрической активности сердца в момент времени t [6]. Благодаря этому удается с высокой точностью восстановить полезный сигнал (эталонный цикл), оценить форму его элементов, в частности форму зубца Т, и учесть скоростные изменения ЭКГ, на ценность которых давно уже обращали внимание кардиологи (рис. 1).

Фазовый портрет ЭКГ подобно векторкардиограмме содержит петли зубцов Р, Т и комплекса QRS (рис. 2), но, в отличие от традиционной векторкардиограммы, может быть построен по сигналу *одного отведения*, например, первого стандартного отведения.

Установлено, что анализ показателя β_T , характеризующего симметрию участка реполяризации, и оценка его среднеквадратического отклонения (СКО β_T) позволяет проводить оценку функциональных резервов миокарда [7].

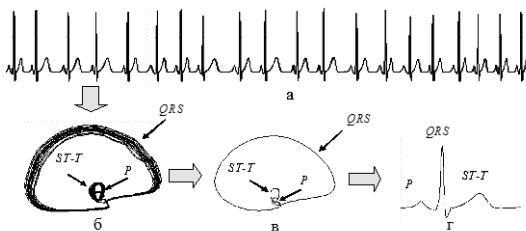


Рис. 1. Последовательность этапов обработки ЭКГ комплексом ФАЗАГРАФ®: исходная ЭКГ (а); ее фазовая траектория (б); усредненная фазовая траектория (в); восстановленный эталонный цикл ЭКГ во временной области (г).

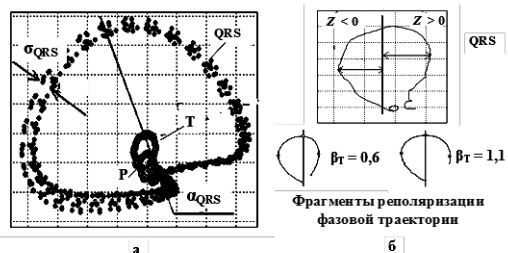


Рис. 2. Фазовый портрет ЭКГ на плоскости $z(t)$, $z'(t)$ в виде периодического аттрактора (а) и фрагменты реполяризации, отображенные на фазовой плоскости (б).

Дополнительную диагностическую информацию несут и другие признаки фазового портрета ЭКГ (рис. 2), такие как угол α_{QRS} ориентации фазового портрета и параметр S_{TR} , характеризующий соотношение площадей петель зубца Т и комплекса QRS на фазовой плоскости $z(t)$, $z'(t)$ [8].

В работе [9] впервые было описано еще одно свойство фазового портрета одноканальной ЭКГ: под действием физических нагрузок увеличивается показатель σ_{QRS} , характеризующий область рассеивания точек фазового портрета, которая уменьшается после прекращения нагрузки, причем время “восстановления” фазового портрета зависит от степени тренированности испытуемого [10, 11]. Оригинальные компьютерные алгоритмы, направленные на оценку указанных показателей фазового портрета одноканальной ЭКГ, описаны в монографии [6].

Исследование проводилось в период с февраля 2012г по апрель 2014г на следующих базах г. Симферополя:

- Крымского республиканского учреждения (КРУ) “Спортивно-физкультурный диспансер”,
- КРУ “Симферопольский гериатрический пансионат”,
- КРУ “Клинический госпиталь инвалидов и ветеранов войны”,
- КРУ “Крымский республиканский кардиологический диспансер”,
- футбольного клуба “Таврия”,
- Симферопольского мотор-вагонного депо,
- Крымского Федерального университета им. В.И. Вернадского.

Исследование было проведено в соответствии со стандартами надлежащей клинической практики (GCP) и принципами Хельсинской Декларации. Протокол исследования был одобрен этическими комитетами всех участвующих организаций. До включения в исследование у всех участников было получено письменное информированное согласие. В исследованиях принимали участие 825 человек 17-70 лет. Группа лиц с кардиологической патологией состояла из 99 человек 50-70 лет с диагнозом ИБС, ПИКС. В группу условно здоровых вошли волонтеры 17-50 лет ($n=726$), из которых 35 спортсменов-футболистов (кандидаты в мастера спорта и мастера спорта) и 15 операторов электропоездов 30-35 лет.

Регистрацию и анализ ЭКГ в фазовом пространстве с определением параметров β_T , S_{TR} , α_{QRS} и σ_{QRS} , а также СКО β_T проводили с помощью комплекса ФАЗАГРАФ®.

У операторов электропоездов параметры фазового портрета фиксировались до и после шестичасовой рабочей смены.

У условно здоровых юношей и юношей-спортсменов дополнительно производили измерения изучаемых показателей в продолжение нагрузочного теста

при ступенчато возрастающей физической нагрузке при увеличении мощности выполняемой нагрузки на 50 Вт на каждой ступени. Дополнительно с помощью комплекса ФАЗАГРАФ® определяли параметры кардиоинтервалограммы с автоматическим расчетом индекса напряжения (ИН, ед.). Предварительно в этих группах был определен показатель относительного МПК, млмин/кг (Карпман, 1988).

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

Результаты и обсуждение

Диагностическая эффективность показателя β_T оценивалась площадью AUC под экспериментальной ROC-кривой, которая строилась координатах S_E и $1-S_P$, где S_E — чувствительность и S_P — специфичность (рис. 3). Для построения кривой использовали

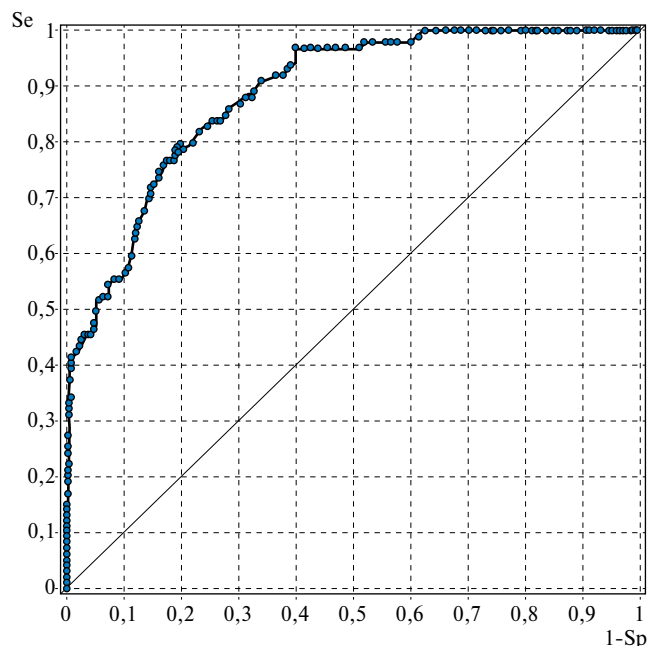


Рис. 3. Экспериментальная ROC-кривая, построенная по результатам анализа показателя β_T .

Таблица 1

Площадь AUC под ROC-кривой для параметров зубца Т

Показатель	AUC, ед.
β_T , ед.	0,886
СКО β_T , ед.	0,762
Амплитуда Т, мВ	0,751
Продолжительность Т, с	0,737

Таблица 2

Схема принятия решений по совокупности 4-х показателей

Решение о функциональном состоянии сердечно-сосудистой системы	Условие, налагаемые на значения показателей β_T , S_{TR} , α_{QRS} и σ_{QRS}
Функциональная норма	Все показатели в пределах референтных диапазонов
Условно нормальное	Один из показателей вне референтного диапазона
Низкий риск нарушений	Два показателя вне референтного диапазона
Средний риск нарушений	Три показателя вне референтного диапазона
Высокий риск нарушений	Четыре показателя вне референтного диапазона

Таблица 3

Примеры диагностических решений по совокупности показателей фазового портрета одноканальной ЭКГ

Значения показателей				Решение о функциональном состоянии сердечно-сосудистой системы
α_{QRS} , град	σ_{QRS} , у.о	β_T , у.о	S_{TR} , у.о.	
110—185	<30	<0,788	>0,02	ФИЗИОЛОГИЧЕСКАЯ НОРМА
<110	<30	<0,788	>0,02	УСЛОВНО НОРМАЛЬНОЕ
110—185	≥ 30	<0,788	>0,02	УСЛОВНО НОРМАЛЬНОЕ
110—185	<30	<0,788	≤ 0,02	УСЛОВНО НОРМАЛЬНОЕ
110—185	<30	≥ 0,788	>0,02	УСЛОВНО НОРМАЛЬНОЕ
<110	≥ 30	<0,788	>0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	≥ 30	<0,788	>0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	<30	<0,788	≤ 0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	<30	<0,788	≤ 0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	<30	≥ 0,788	>0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	<30	≥ 0,788	>0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
110—185	≥ 30	≥ 0,788	>0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
110—185	<30	≥ 0,788	≤ 0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
110—185	≥ 30	<0,788	≤ 0,02	НИЗКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	≥ 30	<0,788	≤ 0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	≥ 30	<0,788	≤ 0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	≥ 30	≥ 0,788	>0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	≥ 30	≥ 0,788	>0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
>185	<30	≥ 0,788	≤ 0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	<30	≥ 0,788	≤ 0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
110—185	≥ 30	≥ 0,788	≤ 0,02	СРЕДНИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ
<110	≥ 30	≥ 0,788	≤ 0,02	ВЫСОКИЙ РИСК НАРУШЕНИЙ

99 записей ЭКГ кардиологических больных и 726 записей ЭКГ здоровых добровольцев.

Как известно, площадь AUC определяет среднюю чувствительность диагностического теста S_E при возможных значениях специфичности $0 \leq S_p \leq 1$. Установлено, что $AUC = 0,889$ ед. для показателя β_T .

Для сравнения в таблице 1 представлены результаты оценки площадей AUC, вычисленных по этим же данным для других параметров зубца Т. Приведенные данные подтверждают высокую диагностическую ценность показателя β_T .

Установлено также, что простое пороговое правило:

НОРМА, если $\beta_T \leq \beta_{T0}$, (1)

ВНИМАНИЕ, если $\beta_T > \beta_{T0}$,

при $\beta_{T0} \approx 0,788$ обеспечивается чувствительность $S_E = 78,8\%$ и специфичность $S_p = 80,3\%$.

Важно отметить, что на всех записях ЭКГ кардиологических больных, которые использованы для построения ROC-кривой, зубец Т был в положительной зоне, а смещение сегмента ST не превышало допустимых пределов. Поэтому диагностический тест (1) с такими сравнительно высокими операционными характеристиками, полученными по результатам анализа одноканальной ЭКГ на таком “сложном” для диагностики клиническом материале, вполне можно считать полезным для скрининговых обследований.

Аналогичным образом определены референтные диапазоны трех других показателей:

НОРМА, если $110 < \alpha_{QRS} < 185$ град. (2)

НОРМА, если $\sigma_{QRS} < 30$ у.е. (3)

НОРМА, если $S_{TR} > 0,02$ у.е. (4)

¹ По мере накопления данных указанные референтные величины будут уточняться.

Таблица 4

**Коэффициенты ранговой корреляции в группах больных
с кардиологической патологией и условно-здоровых волонтеров 17-70 лет, n=224**

Условия	Больные с кардиологической патологией (n=99)				Условно здоровые (n=125)			
Параметры	β_T	СКО β_T	α_{QRS}	σ_{QRS}	β_T	СКО β_T	α_{QRS}	σ_{QRS}
β_T	1,00	0,66*	-0,06	0,19	1,00	0,45*	-0,373	0,07
СКО β_T	0,66*	1,00	0,04	0,11	0,45*	1,00	-0,21	0,12
α_{QRS}	-0,06	0,04	1,00	0,27	-0,37	-0,21	1,00	-0,02
σ_{QRS}	0,19	0,11	0,27	1,00	0,07	0,12	-0,02	1,00

Примечание: * — корреляции значимы на уровне $p < 0,05$.

Таблица 5

**Изменение показателей фазового портрета после нагрузки 250 Вт
в группах с разным уровнем адаптационного потенциала, n=24**

Показатели	Условно-здоровые юноши 17-19 лет (группа 1, n=12)			Юноши-спортсмены 17-19 лет (группа 2, n=12)		
	До нагрузки, M±m	После нагрузки, M±m	Δ , %	До нагрузки, M±m	После нагрузки, M±m	Δ , %
β_T	0,79±0,03	1,10±0,04	39,0**	0,69±0,03 ^{§§}	0,93±0,03 ^{§§§}	34,7***
СКО β_T	0,13±0,02	0,16±0,01	23,3	0,08±0,01 ^{§§}	0,12±0,01 ^{§§}	50,1***
σ_{QRS}	20,8±1,7	32,0±2,5	53,5***	19,1±1,9	33,5±2,3	75,3***
α_{QRS}	132	167	26,5	116	184	58,6 [†]

Примечания: * — $p \leq 0,05$, ** — $p \leq 0,01$, *** — $p \leq 0,001$ — достоверность изменений относительно покоя по критерию Стьюдента, [†] — $p \leq 0,05$ — достоверность изменений относительно покоя по критерию Манна-Уитни, ^{§§} — $p \leq 0,01$, ^{§§§} — $p \leq 0,001$ — достоверность различий первой и второй групп по критерию Стьюдента.

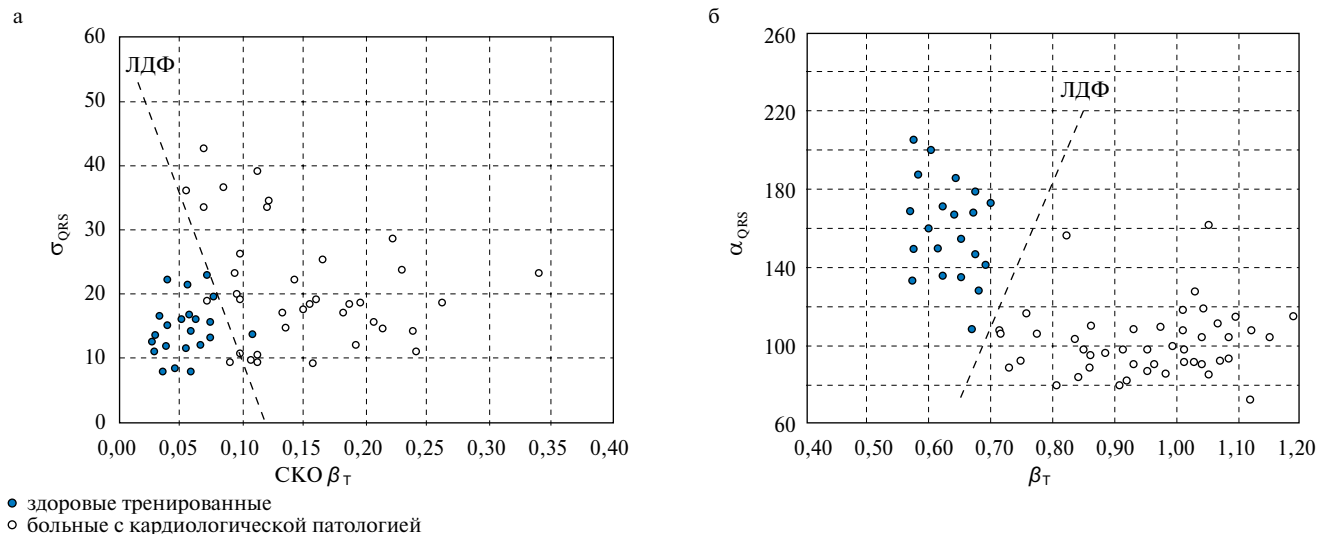


Рис. 4. Диаграммы рассеивания совокупности признаков в группах условно-здоровых тренированных лиц и больных с кардиологической патологией.

Один из возможных подходов к принятию решений о функциональном состоянии сердечно-сосудистой системы по совокупности показателей β_T , S_{TR} , α_{QRS} и σ_{QRS} , основанный на принципе равноправных «голосований», представлен в таблице 2. Некоторые варианты таких решений показаны в таблице 3.

Статистический анализ показал, что между показателями α_{QRS} - β_T и σ_{QRS} -СКО β_T как в группе здоровых лиц, так и в группе лиц с кардиологической патоло-

гией, практически отсутствует корреляционная взаимосвязь (табл. 4).

В то же время, диаграммы рассеивания пар значений показателей, соответствующие условно здоровым тренированным лицам и больным с кардиологической патологией, образуют компактные области, которые достаточно далеки друг от друга (рис. 4.). Вероятно, эти показатели с разных сторон отражают патогенетические особенности дисфункции. Так, например, у пациентов с кардиологической патоло-

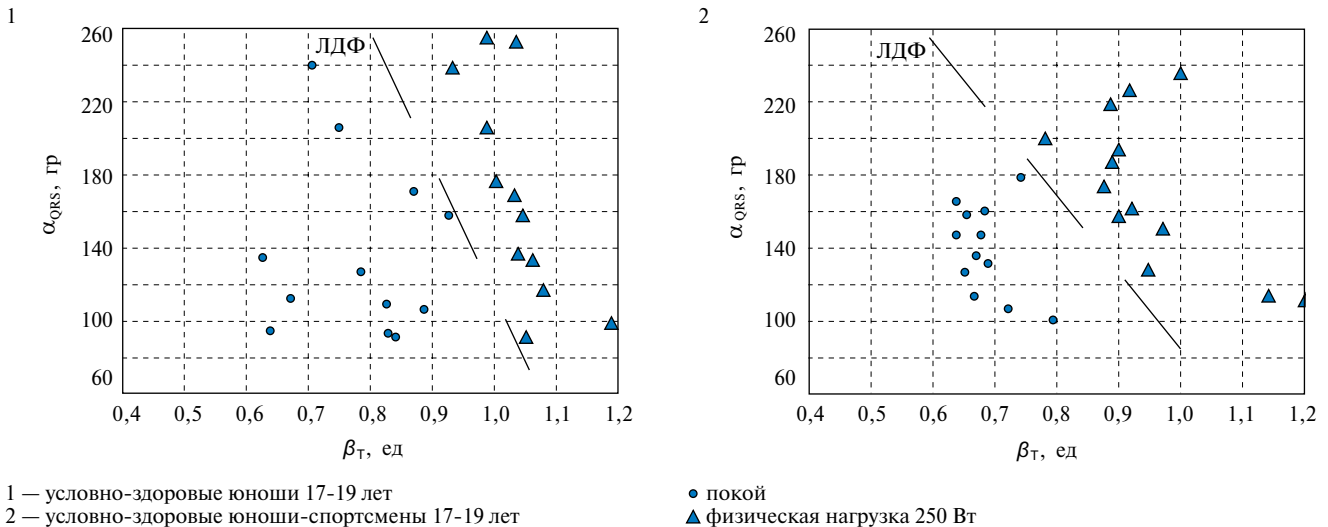


Рис. 5. Диаграммы рассеивания совокупности показателей фазового портрета при физической нагрузке 250 Вт у юношей с разным уровнем функциональных резервов.

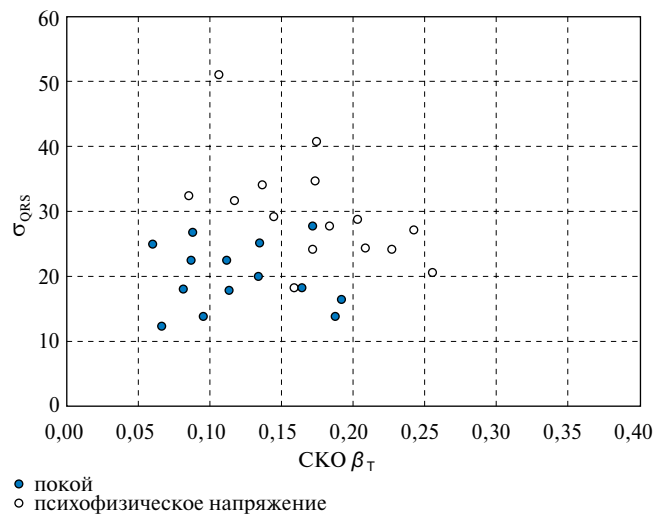


Рис. 6. Диаграмма рассеивания совокупности признаков фазового портрета у операторов электропоездов до и после психофизической нагрузки.

гией происходит заметное уменьшение угла α_{QRS} при росте показателя β_T (рис 4, б).

Четко видно (рис. 4), что в пространстве двух показателей можно проводить разделение представителей указанных групп, используя линейную дискриминантную функцию (ЛДФ), которая не параллельна осям координат, а, значит, обеспечивает более эффективное разделение, чем каждый показатель в отдельности.

Установлено, что средние значения показателей β_T , СКО β_T , σ_{QRS} , α_{QRS} , а также их изменения Δ под действием физической нагрузки, зависят от уровня адаптационного потенциала (табл. 5). Так юноши-спортсмены второй группы с большими резервами адаптации (МПК = $55,5 \pm 4,9$ млмин/кг) характеризовались исходно малыми значениями β_T и СКО β_T , что

соответственно на 23, 7% ($p < 0,01$) и на 39, 5% ($p < 0,01$) меньше, чем у первой группы, которую составили юноши с более низким уровнем адаптационного потенциала (МПК- $41,7 \pm 2,5$ млмин/кг).

Обнаружено также, что у юношей-спортсменов приспособление к физической нагрузке мощностью 250 Вт (ИН = $110 \pm 15,8$ усл. ед.) характеризовалось меньшими изменениями Δ значений показателя β_T по сравнению с юношами первой группы ($p < 0,01$) при существенно большем росте значений угла α_{QRS} ($p < 0,01$), в то время как у представителей группы 1 при высоком напряжении механизмов регуляции (ИН = $210,4 \pm 25,2$) наблюдалась противоположная тенденция: рост значений β_T происходил на фоне существенно меньших изменений Δ показателя α_{QRS} . Можно предположить, что в процессе систематических физических тренировок сердечно-сосудистая система спортсмена “обучается” выбирать более эффективные методы управления, которые и проявляются в наблюдаемых тенденциях изменений показателя α_{QRS} по сравнению с нетренированными юношами.

Примечательно, что у молодых людей без кардиологической патологии, независимо от уровня их тренированности, под действием внешней нагрузки происходит рост и показателя β_T и показателя α_{QRS} (рис. 5) в отличие от кардиологических больных, которые, по сравнению со здоровыми добровольцами, даже в состоянии покоя демонстрировали противоположную тенденцию изменений показателей β_T и α_{QRS} (рис. 4, б): рост показателя β_T сопровождался снижением значений показателя α_{QRS} .

Вероятно, одновременный рост значений показателей β_T и α_{QRS} под действием внешней нагрузки можно считать оптимальной стратегией развития адаптации, обеспечивающей более эффективное функционирование сердечно-сосудистой системы.

Примечательно, что не только направленность, но и “размеры” области значений пар показателей несут информацию об особенностях адаптации. Для иллюстрации на рисунке 6 представлена скаттерграмма значений пар показателей σ_{QRS} и СКО β_T фазового портрета одноканальной ЭКГ, которые регистрировались у водителей электропоездов до и после шестичасовой психофизической нагрузки. Установлено, что после шестичасовой нагрузки при относительно стабильных показателях ЧСС ($74,2 \pm 2,1$ уд./мин), артериального систолического ($124,3 \pm 3,2$ мм рт.ст.) и диастолического ($70,4 \pm 2,7$ мм рт.ст.) давлений происходит расширение области скаттерграммы. После нагрузки диаметр области скаттерграммы, определяемый наиболее удаленными точками, увеличился почти на 50%, что свидетельствует о ценности исследования совокупности признаков фазового портрета ЭКГ для выявления эффектов стресс-реакции при оценке эффективности функционирования сердечно-сосудистой системы.

Литература

1. De Torbal A, Boersma E, Kors JA, et al. Incidence of recognized and unrecognized myocardial infarction in men and women aged 55 and older: the Rotterdam Study. *Eur Heart J*. 2006; 27 (6): 729-36.
2. Hadarcev AA. Theoretical foundations of new medical technologies. *Bulletin of the International Academy of Sciences (Russian section)*. 2011; 1: 22-8. Russian (Хадарцев А.А. Теоретические основы новых медицинских технологий. Вестник Международной академии наук (Русская секция). 2011; 1: 22-8).
3. Es'kov VM, Hadarcev AA, Gudkov AV, et al. Philosophical and biophysical interpretation of life in the third paradigm. *Bulletin of new medical technologies*. 2012; XIX, 1: 38-4. Russian (Есков В.М., Хадарцев А.А., Гудков А.В. и др. Философско-биофизическая интерпретация жизни в рамках третьей парадигмы. Вестник новых медицинских технологий. 2012; XIX, 1: 38-42).
4. Gricenko VI, Fainzilberg LS. Information technology FASEGRAPH® for integrated assessment of the cardiovascular system on the phase portrait of the electrocardiogram. The doctor and information technology. 2013; 3:52-63. Russian (Гриценко В.И., Файнзилберг Л.С. Информационная технология ФАЗАГРАФ® для интегральной оценки состояния сердечно-сосудистой системы по фазовому портрету электрокардиограммы. Врач и информационные технологии. 2013; 3: 52-63).
5. Fainzilberg LS. FASEGRAPH® — effective information technology processing ECG in the task of screening for coronary heart disease. *Clinical Informatics and telemedicine*. 2010; 6-7: 22-30. Russian (Файнзилберг Л.С. ФАЗАГРАФ® — эффективная информационная технология обработки ЭКГ в задаче скрининга ишемической болезни сердца. Клиническая информатика и телемедицина. 2010; 6-7: 22-30).
6. Fainzilberg LS. Computer diagnostics on the phase portrait of the electrocardiogram. *Kiev: Osvita Ukrainy*; 2013. Russian (Файнзилберг Л.С. Компьютерная диагностика по фазовому портрету электрокардиограммы. Киев: Освита України; 2013).
7. Minina EN. Analysis of wave T ECG in phase space in the definition of the functional reserves of the myocardium. *Scientific notes of Taurida national University named after V.I. Vernadsky*. 2013; 26 (65), 2: 148-53. Russian (Минина Е.Н. Анализ волны Т ЭКГ в фазовом пространстве в определении функциональных резервов миокарда. Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. 2013; 26 (65), 2: 148-53).
8. Fainzilberg LS, Minina EN. Study of the diagnostic value of the orientation angle of the phase portrait single-channel ECG as an indicator of the functional state of the myocardium. *Clinical Informatics and telemedicine*. 2013; 9-10: 33-42. Russian (Файнзилберг Л.С., Минина Е.Н. Исследование диагностической ценности угла ориентации фазового портрета одноканальной ЭКГ как индикатора функционального состояния миокарда. Клиническая информатика и телемедицина. 2013; 9-10: 33-42).
9. Fainzilberg LS, Potapova TP. 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; 668-73.
10. Minina EN, Fainzilberg LS. The phase portrait of the single-channel ECG in the evaluation of the functional capacity of the cardiovascular system. *Journal of new medical technologies*. 2014; 21-3: 22-7. Russian (Минина Е.Н., Файнзилберг Л.С., Фазовый портрет одноканальной ЭКГ в оценке функциональных резервов сердечно-сосудистой системы. Вестник новых медицинских технологий. 2014; 21-3: 22-7).
11. Fainzilberg LS, Minina EN. Assessment of the functional state of the cardiovascular system on the magnitude of the dispersion phase trajectories single-channel ECG. *Cybernetics and computer engineering*. 2014; 175: 5-19. Russian (Файнзилберг Л.С., Минина Е.Н. Оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы по величине разброса фазовых траекторий одноканальной ЭКГ. Кибернетика и вычислительная техника. 2014; 175: 5-19).

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что:

1. Диагностические признаки ЭКГ более выразительно проявляются при отображении сигнала в фазовых координатах $z(t)$, $z'(t)$, чем во временной области $z(t)$;
2. Совокупность показателей фазового портрета, которые автоматически вычисляются комплексом ФАЗАГРАФ®, позволяют расширить возможности одноканальной ЭКГ;
3. Направление перемещения и “размер” области значений пар показателей фазового портрета несут информацию об особенностях компенсаторно-приспособительных процессов при срочной и долговременной адаптации;
4. Предложенная схема принятия диагностических решений по совокупности β_T , S_{TR} , α_{QRS} , σ_{QRS} дает возможность оценивать эффективность функционирования сердечно-сосудистой системы при скрининговых обследованиях.