

УДК 616.12 – 07 (477)(063)

А.Л. Опарин<sup>1</sup>, Ю.С. Рудык<sup>1</sup>, И.Е. Овчаренко<sup>2</sup><sup>1</sup> ГУ Институт терапии им. Л.Т. Малой НАМН Украины, Харьков<sup>2</sup> ГУБ Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

## СООТНОШЕНИЕ ВОСХОДЯЩЕЙ И НИСХОДЯЩЕЙ ФАЗ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКГ И ХОЛТЕРОГРАММ У ПАЦИЕНТОВ С СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ

«Не логика, не философия, не метафизика, решают в последней инстанции, верно, что-либо или ложно, а дело. То, что ведёт нас к верному делу, то и есть истина. Поэтому я считаю завоевания техники, не побочными продуктами естественных наук, а логическими доказательствами. Если бы мы не достигли этих практических результатов, мы не знали бы как рассуждать».

Л. Больцман. Цитируется по Н.Н. Боголюбов. Собрание научных трудов, том 5, стр. 716. М. Наука 2006 г.  
«В природе нет ничего в чём бы ни был виден смысл какого либо максимума или минимума»

Л. Эйлер

*Рассматривается комплекс показателей, основанных на измерении асимметрии электрических сигналов сердца – показатели асимметрии зубцов R и T ЭКГ, длительность интервала QT, показатели турбулентности ритма сердца, индексы замедления и ускорения сердечного ритма. Наиболее достоверные отличия в группе больных с СН и без таковой наблюдаются между показателями акселерации и асимметрии зубца R. Показана перспективность метода PRSA, позволяющего анализировать процессы с заранее неопределённой фазой.*

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, ритм сердца, турбулентность, акселерация, децелерация.

### Введение

Данное сообщение представляет собой дальнейшее развитие в одном из направлений перформенного (т.е. предполагающего возможность для пользователя стандартными приёмами заменить функциональные блоки и расширить их при необходимости) расширения измерительного комплекса, описанного в [1, 2].

Здесь внимание акцентируется на оценках симметрии в записях электрической активности сердца. Картина соотношений восходящей и нисходящей фаз в различных отведениях электрокардиограммы (ЭКГ), в том числе данных Холтеровского мониторинга позволяет установить топологические характеристики рассматриваемых соотношений. По нашему мнению, это перспективно для разработки лечебно-диагностических и профилактических мероприятий. Последовательность смены фаз циклов, взаимоотношения длительностей интервалов ЭКГ позволяет прояснить ряд особенностей возможных механизмов сердечной активности, как для отдельного исследуемого, так и контингентов исследуемых.

В исследовании производился сравнительный анализ показателей асимметрии отдельных зубцов ЭКГ с показателями, оценивающими фазы учащения и замедления частоты сердечных сокращений (ЧСС) по данным суточного мониторинга ЭКГ. Для оценки двухфазной реакции ритма сердца на эндогенные (например, экстрасистолы) или экзоген-

ные воздействия использовали недавно разработанные критерии «турбулентности» ритма сердца [3] и критерии акселерации/децелерации ритма [4].

Мы рассматривали комплекс показателей, основанных на измерении асимметрии электрических сигналов сердца включающий:

1. Показатели асимметрии зубцов R и T ЭКГ, оцениваемые как отношение тангенсов угла наклона восходящей и нисходящей фаз (kR и kT, соответственно).

2. Длительность интервала QT, оценивающую относительную длительность «электрической систолы» сердца.

3. Показатели турбулентности ритма сердца, оцениваемые по значениям turbulence onset (TO) и turbulence slope (TS).

4. Индексы замедления (deceleration capacity – DC) и ускорения (acceleration capacity – AC) сердечного ритма, базирующиеся на методе PRSA (Phase-rectified signal averaging) [5], который позволяет оценивать компоненты ритмов с заранее неопределённой фазой.

Опишем подробнее методики измерения и значение этих показателей.

### Основной материал исследований

#### Асимметрия зубца R.

Зубец R отражает деполяризацию основной массы миокарда желудочков. Мы оценивали коэффициент асимметрии R-зубца, предложенный в [6, 7] и определяемый как отношение тангенса угла

подъема к тангенсу угла спада. В случае, если восходящий фронт круче нисходящего, коэффициент считается положительным, если восходящий положе нисходящего – отрицательным. Авторы утверждают наличие связи предложенного показателя со временем внутреннего отклонения, оценивающего скорость распространения возбуждения от эндокарда до эпикарда.

### Зубец Т.

**Зубец Т** отражает реполяризацию желудочков, реполяризация эпикарда совпадает с пиком зубца Т. Вторая часть зубца Т соответствует относительному рефрактерному периоду (или уязвимому периоду). Зубец Т свидетельствует об окончании фазы желудочковой реполяризации. У здоровых людей зубец Т является асимметричным с медленным подъемом и быстрым спуском. При сердечных заболеваниях зубец Т имеет тенденцию к симметричности. Эта симметричность объясняется повышением дисперсии региональной реполяризации сердечной мышцы. Оценка асимметрии зубца Т является важным диагностическим критерием ишемии миокарда [8].

Интервал QT – расстояние от начала комплекса QRS до завершения зубца Т.

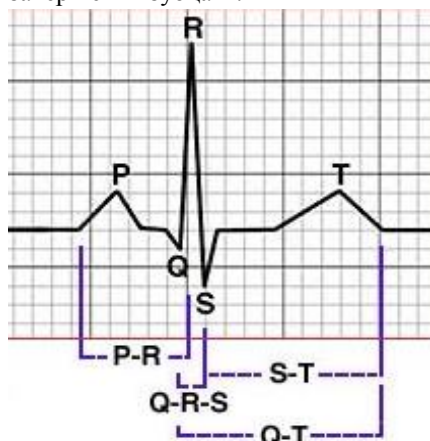


Рис. 1. Схематическое изображение нормальной ЭКГ, с указанием зубцов, интервалов и сегментов

С точки зрения электрофизиологии интервал QT отражает сумму процессов деполяризации (электрическое возбуждение со сменой заряда клеток) и последующей реполяризации (восстановление электрического заряда) миокарда желудочков. Часто этот параметр называют электрической систолой сердца. Так как длительность интервала QT зависит от частоты сердечного ритма (удлиняясь при его замедлении), для оценки она должна быть скорректирована относительно ЧСС. Чаще всего используют формулы Базетта

$$QTc = QT / \sqrt{RR},$$

где QTc – скорректированная (относительно частоты сердечных сокращений) величина интервала QT, относительная величина;

RR – расстояние между данным комплексом QRS и предшествующим ему, выражается в секундах.

При удлинении интервала QT повышается риск развития фатальных нарушений ритма, в том числе полиморфной (веретенообразной) желудочковой тахикардии, которая несет непосредственную угрозу жизни пациента. Удлинение (в некоторой мере, и укорочение) интервала QT отражает неомогенность (неоднородность) процессов реполяризации миокарда желудочков, и расценивается как независимый предиктор фатальных нарушений ритма сердца.

### «Турбулентность сердечного ритма» (ТСР).

Было замечено, что за желудочковой экстрасистолой (ЖЭ) следуют короткие колебания продолжительности синусового цикла (RR интервалов). Этот феномен впервые был описан исследовательской группой под руководством G.Schmidt [3] в 1999 году, в дальнейшем он и послужил основой понятия «турбулентность сердечного ритма» (ТСР). Термин ТСР применяется для описания краткосрочных колебаний в продолжительности синусового цикла, которые следуют после ЖЭ. Обычно сразу после ЖЭ синусовый ритм учащается и затем вновь замедляется, приходя к исходным значениям (рис. 2).

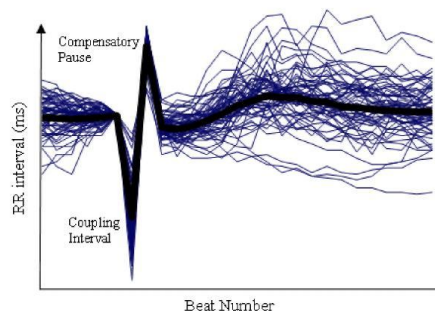


Рис. 2. Пример турбулентности сердечного ритма.

Вслед за компенсаторной паузой наблюдается ускорение сердечного ритма, а затем его замедление

Значения  $TO < 0\%$  и  $TS > 2,5$  мс/RR считаются нормальными, а  $TO > 0\%$  и  $TS < 2,5$  мс/RR – патологическими. Учащение синусового ритма, следующее за его кратковременным урежением, считается физиологическим ответом на ЖЭ. Группой G. Schmidt [3] были предложены два показателя ТСР: начало турбулентности – turbulence onset (TO) и наклон турбулентности – turbulence slope (TS). TO – это величина учащения синусового ритма вслед за ЖЭ, а TS – это интенсивность замедления синусового ритма, следующего за его учащением. Показатель TO рассчитывается, как отношение разницы между суммами значений первых двух синусовых RR интервалов, следующих за ЖЭ, и последних двух синусовых RR интервалов перед ЖЭ к сумме двух синусовых RR интервалов до ЖЭ, выраженное в процентах.

Для расчета TO используется формула:

$$TO (\%) = 100 \times \{ (RR[1] + RR[2]) - (RR[-3] + RR[-2]) \} / (RR[-3] + RR[-2]),$$

где RR-2 и RR-3 – первый и второй синусовые RR интервалы, предшествующие эктопическому комплексу; RR1 и RR2 – первый и второй синусовые RR интервалы, следующие после компенсаторной паузы.

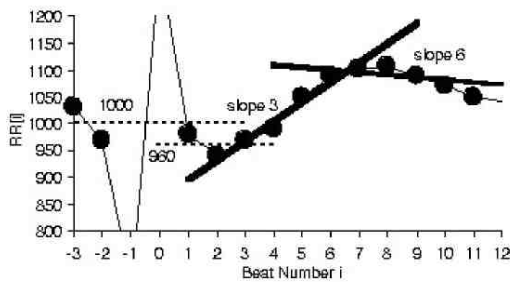


Рис. 3. Пример расчетов показателей TCP: TO – начало турбулентности, TS – наклон турбулентности. Выбран максимальный положительный регрессионный наклон RR[4]~RR [8]

Для определения TS (мс/RR) рассчитывается наклон изменений RR интервалов с помощью прямых линий регрессии для каждых 5 RR интервалов из 20 следующих за компенсаторной паузой (RR[1]~RR[5], RR[2]~RR[6] ... RR[16]~RR[20]). За значение TS принимается максимальный положительный регрессионный наклон (рис. 2).

В исследованиях G. Schmidt для расчета TCP используются записи ЭКГ, которые содержат 3 – 5 синусовых RR интервалов, идущих подряд до ЖЭ и 15 – 20 интервалов, следующих за компенсаторной паузой. Показатели TCP могут быть измерены для каждой ЖЭ и представлены средним значением со стандартным отклонением, кроме того, допускается усреднение для групп ЖЭ, удовлетворяющих каким-либо критериям отбора, например, нормализованному интервалу сцепления [2]. Из анализа исключаются RR, соответствующие следующим показателям: интервалы <300 мс, >2000 мс, с разницей между предшествующими синусовыми интервалами >200 мс, с отличием >20% от среднего из 5 последовательных синусовых интервалов.

#### Phase-rectified signal averaging.

Метод Phase-rectified signal averaging (PRSA) позволяет оценивать закономерности ускорения и замедления сердечного ритма в условиях неопределенности фазы следующей волны ритма сердца. Для этого выбирают в качестве привязки определенную фазу колебательного процесса и объединяют отдельные колебания, представив их как синфазные. Процесс усреднения практически исключает особенности, не имеющие повторений. В качестве узловых точек отсчета (anchor) предложено использовать точки, где наблюдается увеличение или уменьшение значений временного ряда интервалов RR. Процедура усреднения производится и в некоторых окрестностях узловых точек. При таком рассмотрении сегменты временного ряда, привязанные к точкам отсчета, могут перекры-

ваться. Существенно однако, что даже при наличии такого количества условностей при усреднении колебаний сердечного ритма получились кривые, имеющие содержательные особенности (см. рис. из [4]).

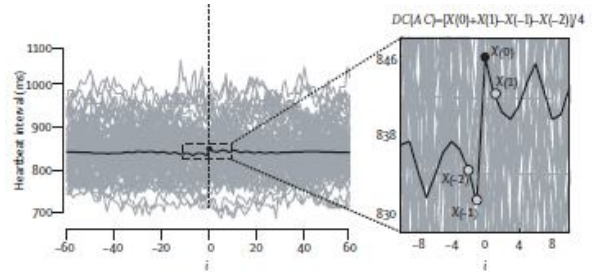


Рис. 4. Применение метода PRSA [4]

Авторы [4] ввели простейшие оценочные характеристики графика PRSA, отражающие некоторые адаптивные характеристики сердца. Эти характеристики содержательны и в случае других циклических процессов, например вращающихся валов. В первую очередь рассматриваются коэффициенты замедления ритма – deceleration capacity (DC), т.е. увеличения RR интервала и acceleration capacity (AC) в случае ускорения ритма. Как оценочный показатель принимается разность между средним значением 2-х точек после узловой точки (X(0),X(1)) на рисунке и 2-х точек (X(-2),X(-1)) до узловой точки. В работе авторов наиболее эффективным в прогностическом смысле оказался показатель DC, оценивающий замедление ритма.

В нашем исследовании использовали результаты обработки суточных записей ЭКГ, произведенные с помощью системы Холтеровского мониторинга Cardiosens v3.0. Сравнивались показатели ЭКГ в группе из 10 пациентов с наличием сердечной недостаточности (СН) II-III функционального класса по NYHA и 15 амбулаторных больных без признаков сердечной недостаточности. Измерение углов наклона фронтов зубцов R и T производили путем оцифровки графиков наиболее часто встречающихся форм ЭКГ с помощью программы Graph Digitizer 1.1. Временные ряды RR интервалов формировали путем их экспорта в текстовый файл, реализуемый в системе Cardiosens v3.0. Оценку критериев ускорения (AC) и замедления (DC) ритма сердца производили с помощью программы, написанной в среде Matlab 7.0 в соответствии с формулами, приведенными выше. Для исключения артефактов и экстрасистол рассматривали RR интервалы, отличающиеся от соседних, не более, чем на 5%.

Из табл. 1 видно, что наиболее достоверные отличия в группах наблюдаются по значениям показателя акселерации (AC), в то время как значения DC в группах были практически идентичны. Следующим по прогностической значимости в нашем исследовании оказался критерий kR, являющийся цифровой оценкой асимметрии зубцов R ЭКГ. Из критериев, характеризующих «турбулентность» ритма сердца тенденция (p<0,1) к отличию в сравниваемых группах выявлена только для показателя TS.

Таблица 1  
Сравнение показателей длительного мониторингирования ЭКГ в группах с отсутствием и наличием СН, M±m

	СН (n=10)	Без СН (n=15)	p
ТО	-0,97±0,75	-0,93±0,61	0,973
ТС	5,11±1,48	9,60±1,15	<b>0,064</b>
DC	5,46±0,40	5,35±0,32	0,825
AC	-39,4±4,7	-64,7±5,1	<b>0,002</b>
ЧСС	75,5±2,5	71,6±1,9	0,180
QTc	411,0±6,7	423,8±5,1	0,140
kR	1,33±0,13	0,89±0,09	<b>0,005</b>
kP	0,96±0,12	0,89±0,09	0,592

Вывод о высокой информативности метода, позволяющего производить количественные оценки временного ряда в условиях заранее неопределенной фазы колебаний, в очередной раз подтверждает, что вариабельность, как и неопределенность результатов измерений, является необходимым условием работоспособности всей кардиосистемы. В то же время открытым остается вопрос о влиянии симпатического и парасимпатического отделов вегетативной нервной системы на соотношение опережения и запаздывания восходящей и нисходящей фаз процессов. Как и ранее, нам представляется актуальной проблема взаимоотношений исполнительных механизмов сердечной деятельности с архетипами человеческой природы.

В процессе работы по изучению электрической активности сердца, носящей предварительный поэтапный характер, большое внимание оказали концепции, изложенные в монографии В.И. Арнольд, Б.А. Хесин Топологические методы в гидродинамике (дополненная и исправленная, перевод с английского, «МЦНМО», 2007 г.). Мы не сомневаемся в

том, что они (концепции) будут ключевыми в будущих исследованиях механизмов электрической активности сердца.

### Список литературы

1. Овчаренко И.Е. О методах оценки параметров колебательных процессов на основе анализа массивов электрокардиографических данных / И.Е. Овчаренко, А.Л. Опарин, Ю.С. Рудык // *Фундаментальные и прикладные проблемы надежности* // Мир измерений. – 2009. – №1. – С. 11-14.
2. Овчаренко И.Е. Долгосрочный кардиопрогноз на основе анализа сердечного ритма и диагностики машин и механизмов / И.Е. Овчаренко, А.Л. Опарин, Ю.С. Рудык. – 26 – 30 октября 2009 г., Санкт-Петербург, С. 125-128.
3. Heart-rate turbulence after ventricular premature beats as a predictor of mortality after acute myocardial infarction / G. Schmidt, M. Malik, P. Barthel et al. // *Lancet*. – 1999. – Vol. 353. – P. 1390-1396.
4. Deceleration capacity of heart rate as a predictor of mortality after myocardial infarction: cohort study / A. Bauer, J.W. Kantelhardt, P. Barthel et al. // *Lancet*. – 2006, May 20. – Vol. 367(9523). – P. 1674-1681.
5. Phase-rectified signal averaging detects quasiperiodicities in non-stationary data / A. Bauer, J.W. Kantelhardt, A. Bunde, M. Malik, R. Schneider, G. Schmidt // *Physica A* 2006;364: 423-34.
6. Изучение восприимчивости миокарда к воздействию кардиотропных средств на примере сердечных гликозидов и антагонистов ионов кальция / В.П. Гулов, Г.И. Сапронов, Е.В. Свирина, Е.И. Пелешенко // *Научно-медицинский вестник Центрального Черноземья*. – 2007. – №27.
7. Пелешенко Е.И. Автоматизированный анализ и моделирование функциональных состояний сердца при действии биологически активных веществ Дис. ... канд. техн. наук / Е.И. Пелешенко. – Воронеж, 1994. – 142 с.
8. Грабб Н.Р. Кардиология / Н.Р. Грабб, Д.Е. Ньюби. – М.: МЕДпресс-информ, 2006. – 704 с.

Поступила в редколлегию 17.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### СПІВІДНОШЕННЯ ВИСХІДНОЇ І НИЗХІДНОЇ ФАЗ ЕЛЕМЕНТІВ ЕКГ І ХОЛТЕРОГРАММ У ПАЦІЄНТІВ З СЕРЦЕВОЮ НЕДОСТАТНІСТЮ

А.Л. Опарін, Ю.С. Рудик, І.Е. Овчаренко

Розглядається комплекс показників, заснованих на вимірюванні асиметрії електричних сигналів серця, – показники асиметрії зубців R і T ЕКГ, тривалість інтервалу QT, показники турбулентності ритму серця, індекси уповільнення і прискорення серцевого ритму. Найбільш достовірні відмінності в групі хворих з СН і без такої спостерігаються між показниками акселерації і асиметрії зубця R. Показана перспективність методу PRSA, що дозволяє аналізувати процеси із заздалегідь невизначеною фазою.

**Ключові слова:** електрокардіограма, ритм серця, турбулентність, акселерація, децелерація.

### CORRELATION OF ASCENDING AND DESCENDING PHASES OF ELEMENTS OF EKG AND KHOLTEROGRAMM FOR PATIENTS WITH CARDIAC INSUFFICIENCY

A.L. Oparin, Yu.S. Rudyk, I.E. Ovcharenko

The complex of indexes, based on measuring of asymmetry of electric signals of heart – indexes of asymmetry of indents of R and T of EKG, duration of interval of QT, indexes of turbulence of rhythm of heart, indexes of deceleration and acceleration of cardiac rhythm is examined. Most reliable differences in the group of patients with SN and without such observed between the indexes of acceleration and asymmetry of indent of R. Perspective of method of PRSA, allowing to analyse processes with a beforehand indefinite phase is rotined.

**Keywords:** electrocardiogram, rhythm of heart, turbulence, acceleration, deceleration.