

## ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ В ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ В ХОДЕ НАГРУЗОЧНОЙ ПРОБЫ

И.А. Чайковский, А.Н. Ломаковский, С.И. Деяк, Л.С. Файнзильберг,  
Н.А. Семергей, М.И. Лутай

Национальный научный центр «Институт кардиологии им. акад. Н.Д. Стражеско»  
АМН Украины, г. Киев

Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем  
НАН Украины и МОН Украины, г. Киев

Пробы с дозированной физической нагрузкой широко применяют в кардиологической клинике с целью выявления коронарной недостаточности, транзиторных нарушений ритма сердца, определения работоспособности, прогноза, выбора тактики лечения и оценки эффективности проведенной терапии. В то же время чувствительность и специфичность этой пробы в диагностике ишемической болезни сердца (ИБС) недостаточно высоки. Даже при адекватном тесте с физической нагрузкой чувствительность теста при выявлении ишемии колеблется в пределах 45–68 %, а специфичность – 50–90 % [2]. С другой стороны, массовое проведение проб с физической нагрузкой на велоэргометре или тредмиле требует значимых временных затрат квалифицированного медицинского персонала. Поэтому разработка технологий, которые повышают информативность пробы с дозированной физической нагрузкой, является весьма актуальной и обоснованной. Особую ценность представляют те технологии, которые можно было бы использовать для массового скрининга пациентов, имеющих угрозу развития ИБС.

Скрининговая технология должна соответствовать двум обязательным требованиям – иметь высокую чувствительность, с одной стороны, и быть максимально дешевой и простой в использовании. Современные компьютерные технологии регистрации и анализа электрокардиограммы (ЭКГ) перспективны в этом отношении. На протяжении ряда лет в Международном научно-учебном центре информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины (МНУЦИТИС) разрабатывают оригинальную технологию регистрации и обработки ЭКГ в фазовом пространстве координат [3]. Этот метод позволяет одновременно анализировать как амплитудные, так и скоростные параметры любых элементов электрокардиосигнала, что дает возможность с высокой точностью оценивать форму ЭКГ и выявить в ней такие отклонения, которые обычно скрыты от врача при традиционном анализе ЭКГ.

Такой тонкий анализ морфологии ЭКГ особенно важен при изучении периода реполяризации желудочков (интервал ST-T). Работы последних лет убедительно демонстрируют диагностическую значимость формы волны Т, появился даже отдельный раздел электрокардиографии – анализ морфологии волны Т в 12 отведениях. В наших предыдущих работах также было показано, что анализ формы волны Т в фазовом пространстве существенно повышает чувствительность и специфичность электрокардиографического обследования [1, 4, 6–10].

**Целью работы** явилось исследование связи между изменениями параметров ЭКГ в фазовом пространстве и результатами стандартной пробы с физической нагрузкой у больных с ишемической болезнью сердца и здоровых лиц.

### Материал и методы

Обследованы 36 пациентов (23 мужчины и 13 женщин) в возрасте в среднем ( $56 \pm 5$ ) лет. У 19 обследованных отмечено хроническую ИБС (ХИБС). Контрольную группу составили 17 здоровых добровольцев.

У 14 больных диагноз ИБС был установлен по результатам коронарографии. У 5 больных в прошлом регистрировали инфаркт миокарда с зубцом Q. Здоровые добровольцы не имели сердечно-сосудистой патологии в анамнезе, выполнили тест с физической нагрузкой с отрицательным результатом. В обследование не включали больных с полной блокадой ножек пучка Гиса.

Пробу с дозированной физической нагрузкой проводили в первой половине дня в положении сидя на велоэргометре фирмы «Shiller» (ФРГ). Исследование начинали с нагрузки мощностью 25 Вт. Использовали нагрузку с непрерывно ступенчато нарастающей мощностью при продолжительности каждой ступени 3 мин под постоянным клинико-электрокардиографическим контролем. Каждая следующая ступень превышала предыдущую на 25 Вт. В период восстановления ЭКГ регистрировали на 1, 3-й и 6-й минутах, а при необходимости – до полного ее восстановления. Критериями прекращения пробы служили клинические и электрокардиографические признаки в соответствии с рекомендациями ВОЗ. Результаты тестов делились на позитивные и негативные согласно стандартным критериям.

Регистрацию и анализ ЭКГ в фазовом пространстве проводили с помощью программно-технического комплекса «ФАЗАГРАФ», состоящего из микропроцессорного сенсора, осуществляющего ввод сигнала при прикосновении пальцев обследованного к миниатюрным встроенным электродам или с помощью внешнего электрокардиографического кабеля, и компьютерной программы для анализа и интерпретации введенного сигнала. В комплексе «ФАЗАГРАФ» реализована оригинальная информационная технология обработки электрокардиосигнала в фазовом пространстве с использованием идей когнитивной компьютерной графики и методов автоматического распознавания образов. В нашем исследовании сигнал вводили с помощью 3-электродного электрокардиографического кабеля. При этом красный электрод устанавливали во 2-м межреберье справа у края грудины, а желтый электрод – на уровне 5-го межреберья слева по заднеподмышечной линии, то есть регистрировали отведение «anterior» системы отведений по Небу.

Сущность технологии анализа ЭКГ в фазовом пространстве состоит в том, что в каждой точке временного сигнала  $x(t)$  числовым методом оценивают его первую производную  $dx/dt$  и всю последующую обработку осуществляют на фазовой плоскости в координатах  $x(t)$ - $dx/dt$ . Более подробно технология описана в работе [3]. ЭКГ на фазовой плоскости была усреднена на протяжении каждой ступени нагрузки и каждой минуты периода восстановления.

В качестве основного диагностического признака был выбран показатель  $bT$ , который характеризует симметрию волны Т в фазовом пространстве. Анализировали значения  $bT$  в исходном состоянии, а также изменения этого показателя (в процентах по сравнению с исходным состоянием) на высоте нагрузки ( $DbT1$ ), в начале восстановления ( $DbT2$ ) и в конце восстановления ( $DbT3$ ).

## Результаты и их обсуждение

У всех больных с ХИБС проба с физической нагрузкой была положительной, у всех здоровых добровольцев – отрицательной. Значения  $bT$  в исходном состоянии (в состоянии покоя) у больных с ХИБС были достоверно выше, чем у здоровых лиц.

В обеих группах оценивали динамику показателя  $bT$  во время велоэргометрической пробы (см. таблицу).

У здоровых лиц при отрицательных пробах показатель достиг наивысших значений на высоте нагрузки, несколько снизился в начале реституции и в конце периода реституции лишь на 6 % превышал исходные значения. Другой характер изменений показателя  $bT$ , то есть симметрия зубца Т, был зарегистрирован у больных с ХИБС. В этой группе прирост значений на высоте нагрузки был меньшим (возможно, вследствие высоких исходных значений), а наибольшие значения показателя  $bT$  были зарегистрированы в начале периода

реституции. Это повышение значений показателя bT было протяженным во времени, в конце периода реституции значения bT были значительно более высокими, чем в исходном состоянии.

Стресс-ЭКГ по-прежнему является самым широко используемым методом в обследовании больных с подозрением на ИБС, по образному выражению одного из немецких авторов, «рабочей лошадкой» в пошаговом процессе диагностики ИБС [11]. Однако, как уже было сказано, чувствительность и специфичность метода не соответствуют современным требованиям, составляя в среднем соответственно 68 и 77 %, а в некоторых исследованиях даже 20 % [14]. Стандартная проба с дозированной физической нагрузкой правильно классифицирует, главным образом, больных с мультисосудистым поражением высокой степени и слишком часто допускает ошибки у больных с менее выраженным стенозом [15].

В настоящее время среди исследователей и клиницистов существует определенный консенсус по поводу того, что стандартные электрокардиографические критерии положительной пробы, существовавшие в течение примерно 50 лет, а именно наличие горизонтальной или косонисходящей депрессии сегмента ST минимум 1 мм, должны быть дополнены. Большинство новых индикаторов лежат вне сегмента ST. В последние годы значительное внимание уделяют скорости степени прироста частоты сокращений сердца (ЧСС) на высоте нагрузки [18], скорости восстановления ЧСС в первые минуты после прекращения нагрузки [21], частоте желудочковых нарушений ритма в период восстановления. Эти показатели имеют значительную предсказующую ценность для сердечно-сосудистых событий и внезапной смерти. Из собственно электрокардиографических признаков следует отметить продолжительность комплекса QRS [25], так называемый афинский QRS-индекс, основанный на анализе соотношения амплитуд зубцов Q, R, и S в покое и во время нагрузки [19], использование правых грудных отведений [20] и др. Наибольшее же значение из современных параметров, по-видимому, имеет ST/HR-индекс (или ST/HR-гистерезис) [22]. Этот метод устанавливает связь между степенью депрессии сегмента ST и приростом ЧСС во время нагрузки и в период восстановления. Он в значительной степени позволяет преодолеть недостатки жесткой пороговой логики, на которой основаны стандартные электрокардиографические критерии ишемии. Однако все эти новации, хотя и повышают диагностическую и прогностическую ценность теста с дозированной физической нагрузкой, не делают его безупречным [16].

Ценность анализа симметрии зубца T в фазовом пространстве показана нами ранее в диагностике хронической и острой ишемии миокарда в состоянии покоя [1, 6, 7], в том числе и в эксперименте [8]. Кроме того, клиническую значимость симметрии волны T в диагностике ишемии миокарда, насколько нам известно, впервые продемонстрировали Халфен и соавторы в 80-е годы прошлого века [5]. Было показано, что у больных с ИБС происходит симметризация волны T на ЭКГ. Сходные результаты были получены А. Sasaki и соавторами [23] у больных с бессимптомной ишемией. Электрофизиологическую основу симметризации волны T при патологии интенсивно исследуют в экспериментальной кардиологии. Как известно, форма волны T на ЭКГ зависит от формы, длительности и величины трансмембранных потенциалов действия в различных зонах. В работе [12] рассмотрена модель левого желудочка и убедительно показано, что при увеличении региональной дисперсии длительности фазы 2 потенциала действия происходит увеличение симметрии волны T. Следует упомянуть также работу [13], в которой в эксперименте на изолированном сердце показано, что уширение волны T имеет высокую степень корреляции с увеличением региональной дисперсии длительности монофазного потенциала действия. В то же время в работе [26] показано, что увеличение трансмурального градиента потенциала действия также приводит к появлению более симметричной волны T. Таким образом, по нашему мнению, увеличение симметрии волны T в ходе пробы с физической нагрузкой свидетельствует об увеличении электрической неоднородности миокарда, по-видимому, как региональной, так и трансмуральной. Это предположение подтверждает исследование [24], в котором продемонстрировано увеличение как трансмуральной, так и глобальной дисперсии реполяризации при увеличении ЧСС.

Согласно результатам нашего исследования, в состоянии покоя показатель bT у больных с ИБС был достоверно более высоким, чем у здоровых лиц. Это полностью соответствует результатам наших предыдущих исследований [1]. Увеличение симметрии зубца Т на высоте нагрузки произошло в обеих группах обследованных. Однако если у здоровых добровольцев к 6-й минуте восстановления значения bT практически вернулись к исходным, то у больных с ИБС, у которых пробы были положительными, наибольшие значения были зафиксированы не на высоте нагрузки, а на первой минуте реституции, и к исходу 6-й минуты восстановления все еще на 20 % превышали исходные значения. Особенно важно отметить, что к концу реституции не наблюдали значимой депрессии сегмента ST.

В настоящее время распространено мнение о том, что стандартная электрокардиографическая проба с физической нагрузкой не обладает высокой ценностью в качестве средства скрининга ИБС, то есть не показана у лиц без симптомов заболевания, за исключением, возможно, лиц с несколькими факторами риска [18]. На наш взгляд, использование инструментов, подобных программно-аппаратному комплексу «ФАЗАГРАФ», со временем может способствовать определенному переосмыслению целесообразности такого рода исследований в этой группе. Проведение пробы с помощью комплекса крайне просто и необременительно, требует самых минимальных ресурсов. При условии использования такого варианта дозированной физической нагрузки, как тест Мастера, проба вполне может применяться и в амбулаторных условиях вне специализированного кардиологического учреждения. Конечно, такая проба может носить сугубо предварительный характер. Ее цель – способствовать правильному отбору для последующего более специализированного обследования. По нашему мнению, такое обследование целесообразно проводить у лиц без симптомов заболеваний сердца, у которых реакция ЭКГ в фазовом пространстве при пробе с физической нагрузкой сходна с характером изменений bT в группе больных с ИБС в нашем исследовании.

Данная статья имеет ряд ограничений. Прежде всего, количество исследований в каждой группе должно быть увеличено. Кроме того, желательно увеличить количество отведений, в которых производится анализ в фазовом пространстве. Тем не менее анализ изменений формы волны Т на ЭКГ в фазовом пространстве в ходе пробы с дозированной физической нагрузкой может быть полезным инструментом, увеличивающим информативность пробы.

## **Выводы**

Показатель bT (симметрия волны Т в фазовом пространстве) у больных с ишемической болезнью сердца достоверно более высокий, чем у здоровых лиц, что свидетельствует о возможности использования данного показателя в диагностике ишемической болезни сердца.

Характер изменений показателя bT на протяжении пробы с дозированной физической нагрузкой существенно отличается у здоровых лиц и больных с хронической ишемической болезнью сердца с положительными результатами теста. Так, при отрицательных пробах у здоровых лиц показатель bT достиг наивысших значений на высоте нагрузки и к концу периода реституции незначительно превышал исходные значения. У больных с хронической ишемической болезнью сердца прирост значений bT на высоте нагрузки был меньше, чем у больных с отрицательными результатами тестов, но это повышение было более стабильным – в конце периода реституции значения bT были почти такими, как и в начале реституции, и значительно более высокими, чем в исходном состоянии.

Изменения показателя bT в период реституции по сравнению с исходным состоянием у больных с хронической ишемической болезнью сердца при отсутствии ишемических изменений сегмента ST на ЭКГ свидетельствуют о его большей чувствительности в отображении ишемии миокарда по сравнению с традиционным анализом ЭКГ.

## **Литература**

1. Коваленко В.Н., Чайковский И.А., Файнзильберг Л.С. и др. Диагностическая ценность электрокардиографии в фазовом пространстве для скрининга ишемической болезни сердца // Укр. кардіол. журн. – 2007. – № 6. – С. 13-19
2. Лутай М.И., Немчина Е.А., Цыж А.В. и др. Диагностическая значимость стресс-эхокардиографии с добутамином для определения ишемической болезни сердца // Укр. кардіол. журн. – 2006. – №. – С.
3. Файнзильберг Л.С. Диагностика состояния объектов по фазовым траекториям наблюдаемых сигналов с локально сосредоточенными признаками // Пробл. управления и информатики. – 2004. – № 2. – С. 56-67.
4. Файнзильберг Л.С., Клубова А.Ф., Чайковский И.А. и др. Новый метод анализа ЭКГ больных ревматоидным артритом // Укр. ревматол. журн. – 2001. – № 2. – С. 48-51.
5. Халфен Э.Ш., Сулковская Л.С. Клиническое значение исследования скоростных показателей зубца Т ЭКГ // Кардиология. – 1986. – № 6. – С. 60-62.
6. Чабан Т.І., Чайковський І.А., Файнзильберг Л.С. и др. Можливості аналізу електрокардіограми у фазовому просторі і варіабельності ритму серця в амбулаторних хворих на гіпертонічну хворобу // Укр. мед. часопис. – 2009. – № 4. – С. 31-37.
7. Чайковский И.А., Файнзильберг Л.С. Медицинские аспекты применения устройства «Фазаграф» в клинической практике и в домашних условиях. – Київ: МНУЦИТ и НАН и МОН Украины, 2008. – 84 с.
8. Чайковський І.Н., Батушкін В.В., Файнзильберг Л.С. и др. Короткотривалий прогноз перебігу гострого коронарного синдрому за даними аналізу одноканальної ЕКГ у фазовому просторі та варіабельності ритму серця // Лікарська справа. – 2008. – № 1–2. – С. 57-63.
9. Чайковский И.А., Батушкин В.В., Файнзильберг Л.С. и др. Эффективность оценки течения острого коронарного синдрома по данным анализа первого отведения ЭКГ на фазовой плоскости // Журнал Академії мед. наук. – 2007. – Т. 13. – № 1. – С. 104-113.
10. Чайковський І.А., Нещерет О.П., Файнзильберг Л.С. та ін. Дослідження ішемії міокарда за допомогою нового методу аналізу електрокардіограми // Фізіол. журн. – 2008. – № 6. – С. 42-48.
11. Baer F.M. Stress-ECG is adequate to detect myocardial ischemia: when are additional diagnostic tests needed // Dtsch Med. Wochenschr. – 2008. – № 132(39). – P. 2026-2030.
12. Di Bernardo D., Murray A. Computer model for study of cardiac repolarization // J. Cardiovasc. Electrophysiol. – 2000. – Vol. 11. – P. 895-899.
13. Franz M., Bargheer K., Rafflenbeul W. et al. Monophasic action potential mapping in human subject with normal electrocardiograms: direct evidence for the genesis of the T wave // Circulation. – 1987. – Vol. 75. – P. 379-386.
14. Gianrossi R., Detrano R., Mulvihill D. et al. Exercise-induced ST depression in the diagnosis of coronary artery disease. A meta-analysis // Circulation. – 1989. – Vol. 80. – P. 87-98.

15. Kligfield P., Ameisen O., Okin P.M. Heart rate adjustment of ST segment depression for improved detection of coronary artery disease // *Circulation*. – 1989. – Vol. 79. – P. 245-255.
16. Kligfield P., Lauer M.S. Exercise electrocardiogram testing: beyond the ST segment // *Circulation*. – 2006. – Vol. 114. – P. 2070-2082.
17. Lauer M.S., Francis G.S., Okin P.M. et al. Impaired chronotropic response to exercise stress testing as a predictor of mortality // *JAMA*. – 1999. – Vol. 281. – P. 524-529.
18. Lauer M., Froelicher E.S., Williams M., Kligfield P. Exercise testing in asymptomatic adults: a statement for professionals from the American Heart Association Council on Clinical Cardiology, Subcommittee on Exercise, Cardiac Rehabilitation, and Prevention // *Circulation*. – 2005. – Vol. 112. – P. 771-776.
19. Michaelides A.P., Psomadaki Z.D., Andrikopoulos G.K. et al. A QRS score versus ST-segment changes during exercise testing: which is the most reliable ischaemic marker after myocardial revascularisation? // *Coron. Artery Dis.* – 2003. – Vol. 14. – P. 527-532.
20. Michaelides A.P., Psomadaki Z.D., Dilaveris P.E. Improved detection of coronary artery disease by exercise electrocardiography with the use of right precordial leads // *New Engl. J. Med.* – 1999. – Vol. 340. – P. 340-345.
21. Nishime E.O., Cole C.R., Blackstone E.H. et al. Heart rate recovery and treadmill exercise score as predictors of mortality in patients referred for exercise ECG // *JAMA*. – 2000. – Vol. 284. – P. 1392-1398.
22. Okin P.M., Kligfield P. Heart rate adjustment of ST segment depression and performance of the exercise electrocardiogram: a critical evaluation // *J. Amer. Coll. Cardiol.* – 1995. – Vol. 25. – P. 1726-1735.
23. Sasaki A., Arai T., Shigeta H. Detection of silent myocardial ischemia patients by the spatial velocity electrocardiogram // *Amer. J. Cardiology*. – 1999. – Vol. 84. – P. 1081-1083.
24. Smetana P., Batchvarov N., Hnatkova K. et al. Ventricular gradient and nondipolar repolarization components increase at higher heart rate // *Amer. J. Physiol.* – 2004. – Vol. 286. – P. 131-136.
25. Yosefy C., Cantor A., Reisin L. et al. The diagnostic value of QRS changes for prediction of coronary artery disease during exercise testing in women: false-positive rates // *Coron. Artery Dis.* – 2004. – Vol. 15. – P. 147-154.
26. Yan G., Martin J. Electrocardiographic T-wave: a symbol of transmural dispersion of repolarisation in the ventricles // *J. Cardiovasc. Electrophysiol.* – 2003. – Vol. 14. – P. 639-640.