

ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ФАЗ БЫСТРОГО И МЕДЛЕННОГО ИЗГНАНИЯ НА ЭКГ И УТОЧНЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ТОЧКИ j

DOI: 10.17691/stm2020.12.3.01

УДК 616.12–008.3–073.7/.97

Поступила 13.09.2019 г.



О.К. Воронова, к.т.н., старший научный сотрудник;

В.А. Зернов, д.т.н., профессор, ректор;

М.Ю. Руденко, к.т.н., зав. лабораторией исследования сердечно-сосудистой системы

Российский новый университет, ул. Радио, 22, Москва, 105005

Цель исследования — описать границу фаз быстрого и медленного изгнания в сердечном цикле и уточнить расположение точки j на ЭКГ.

Материалы и методы. Работа основана на теории фазового анализа сердечного цикла с использованием математических уравнений гемодинамики. С помощью уравнений проверялся баланс фазовых диастолических и систолических объемов крови, зависящих от длительностей фаз сердечного цикла. Взаимосвязь длительностей фаз и фазовых объемов крови была использована для точного определения границ фаз сердечного цикла на ЭКГ. Синхронную регистрацию ЭКГ и реограммы применяли для уточнения местоположения точки j.

Результаты. Определена точная граница фаз быстрого и медленного изгнания. Для ее обозначения была введена новая точка L, определяющая границу фаз SL–Lj.

Заключение. Ранее считалось, что точка j — это часть ЭКГ, зависящая от температуры тела, которая не всегда проявляется. Она имела неоднозначное определение — зубец Осборна, или волна j. При этом не была точно определена граница фаз быстрого и медленного изгнания, объемы крови которых в сумме равны ударному объему крови. Выполненная работа позволяет точно определить критерии регистрации на ЭКГ фаз быстрого и медленного изгнания и местоположение точки j.

Ключевые слова: кардиометрия; кардиология; гемодинамика; ЭКГ; реография; точка j.

Как цитировать: Voronova O.K., Zernov V.A., Rudenko M.Yu. The exact definition of the boundary between the rapid and slow ejection phases on ECGs and accurate location of the j point. *Sovremennyye tehnologii v medicine* 2020; 12(3): 6–11, <https://doi.org/10.17691/stm2020.12.3.01>

English

The Exact Definition of the Boundary between the Rapid and Slow Ejection Phases on ECGs and Accurate Location of the j Point

O.K. Voronova, PhD, Senior Researcher;

V.A. Zernov, DSc, Professor, Rector;

M.Yu. Rudenko, PhD, Head of the Laboratory for Cardiovascular System Investigations

Russian New University, 22 Radio St., Moscow, 105005, Russia

Для контактов: Руденко Михаил Юрьевич, e-mail: cardiocode.rudenko@gmail.com

The aim of the study was to describe the boundary between the phases of rapid and slow ejection in the cardiac cycle and to define the exact location of the j point on ECGs.

Materials and Methods. The work is based on the theory of heart cycle phase analysis using mathematical equations of hemodynamics. The balance of phase diastolic and systolic blood volumes depending on the duration of the cardiac cycle phases has been verified by these equations. The interrelation of phase duration and phase blood volumes was employed to exactly define the cardiac cycle boundaries on ECGs. Synchronous recording of the ECG and rheogram was used to determine the precise location of the j point.

Results. The exact boundary between the phases of rapid and slow ejection has been defined. A new point L determining the boundary between SL–Lj phases was introduced for its designation.

Conclusion. The j point was previously considered to be part of an ECG depending on the body temperature and which does not always appear. It had an ambiguous definition: Osborn wave or j wave. At the same time, the precise boundary between the rapid and slow ejection phases, the blood volumes of which in the total amount are equal to the blood stroke volume, has not been identified exactly. The work performed allows for accurate definition of criteria for recording rapid and slow ejection phases and j point location on the ECG.

Key words: cardiometry; cardiology; hemodynamics; ECG; rheography; j point.

Введение

В классическом учении об электрокардиографии важное место занимает расшифровка ЭКГ, в основе которой лежит анализ интервалов, сегментов, зубцов и волн ЭКГ [1, 2]. Несмотря на длительный период практического использования данного анализа, до сих пор не выработано однозначных критериев определения их начала и конца. На этом фоне понимание границ систолической части структуры сердечного цикла ЭКГ сформировалось из множества противоречий. Это относится и к сегменту ST, структура которого слабо изучена. Неоднозначное и непериодическое изменение его формы на регистрируемых ЭКГ не давало возможностей для подробного исследования. Для возмещения этого была предложена электрокардиография высокого разрешения [3], однако даже она не достигла поставленной цели и сегмент ST остался в понимании исследователей как *terra incognita*.

Основной проблемой стали споры относительно расположения на ЭКГ точки j. Непостоянство критериев регистрации ее местоположения постепенно трансформировалось в предложение называть эту точку волной j, которая может проявляться на ЭКГ сразу же за комплексом QRS [4, 5], хотя ряд исследователей продолжали считать, что она расположена ближе к волне T [6]. Клинической причиной, вызывающей проявление точки j, называлось изменение температуры тела [7].

Тот факт, что сегмент ST занимает только половину систолы в сердечном цикле, позволяет думать, что в электрокардиографии еще многое предстоит исследовать. Это подтверждается и другими авторами: например, существует мнение о «невидимых зонах» (*invisible zones*) [8].

В начале 2000-х гг. в России появились публикации по фазовому анализу сердечного цикла [9]. По этой теме были защищены две диссертации [10, 11]. Для более полного определения биологических процессов, соответствующих систолической части ЭКГ, авторам настоящей статьи пришлось вводить новые понятия

в электрокардиографию, которые позволили четко разграничить фазовую структуру систолической части сердечного цикла.

Цель исследования — установление критериев регистрации фаз сердечного цикла в сегменте ST на ЭКГ и уточнение расположения точки j.

Материалы и методы

В работе использовались предложенная нами ранее теория фазового анализа сердечного цикла и математические уравнения гемодинамики Г. Поединцева, О. Вороновой [9]. Данные уравнения основаны на расчете фазовых объемов крови косвенным методом. Функциями для расчета объемных характеристик служат длительности фаз сердечного цикла. Фазовая структура сегмента ST содержит фазу напряжения, быстрого изгнания и медленного изгнания. С учетом того, что точных критериев регистрации границ этих фаз ранее не существовало, был использован принцип сравнения известного и неизвестного. При таком условии выбранные уравнения гемодинамики позволяют рассчитывать фазовые систолические и диастолические объемы крови.

Границы диастолических фаз сердечного цикла фиксируются на ЭКГ четко. Критерии фиксации фаз ранней диастолы и систолы предсердия в теории электрокардиографии не вызывают сомнений. Равенство основано на законе сохранения энергии: сколько крови вошло в сердце, столько же должно и выйти. Поэтому, составляя уравнение из суммы объемов систолических и диастолических фаз, можно увидеть причины расхождений равенства и устранить их.

Данное равенство имеет следующий вид:

$$PV_1 + PV_2 = PV_3 + PV_4,$$

где PV_1 — объем крови, притекающий в желудочек сердца в раннюю диастолу (мл); PV_2 — объем крови, притекающий в желудочек сердца во время систолы предсердия (мл); PV_3 — объем крови, изгоняемый из

желудочка сердца во время быстрого изгнания (мл); PV_4 — объем крови, изгоняемый из желудочка сердца во время медленного изгнания (мл).

На *первом этапе* было необходимо уточнить критерий регистрации точки S — начала фазы напряжения. Расчетные данные, полученные в результате изучения реальных ЭКГ, показывали, что точка S располагается в точке перегиба правой части зубца S. Это отвечает логике биофизических процессов, формирующих форму ЭКГ [9]. С помощью математической первой производной дифференциального исчисления тень зубца S очень легко удается зафиксировать у 100% реальных

ЭКГ. В результате удалось достичь равенства систолических и диастолических объемов крови. Данный факт указывает на правильность установления критериев регистрации точки S.

Затем нужно было получить отдельно составляющие систолического объема крови, а именно PV_3+PV_4 . Для этого требовалось установить критерий фиксации раздела фаз быстрого и медленного изгнания. Принимая во внимание, что в сегменте ST имеется еще и фаза напряжения, ее также следовало учитывать. Во время этой фазы клапан аорты закрыт и кровь не поступает в аорту.

На *втором этапе* решалась задача установки критериев фиксации момента начала открытия клапана аорты, что было гораздо сложнее. Для этого использовали синхронную запись ЭКГ и реограммы (рис. 1).

На рис. 1 видно, что моменту начала подъема кривой реограммы соответствует небольшая волна на ЭКГ. Исследования показали, что эта волна проявляется в каждой записанной ЭКГ. Учитывая, что в литературе не описаны критерии ее фиксации, а также принимая во внимание ее важность в функционировании сердца, мы приняли решение обозначить эту точку буквой L. Таким образом, точка L является началом фазы быстрого изгнания.

На *третьем этапе* необходимо было уточнить критерий фиксации окончания фазы быстрого изгнания, который одновременно является началом фазы медленного изгнания. Фактически это означало определить расположение точки j. Для этого также использовали синхронную запись ЭКГ и реограммы (рис. 2).

Как видно из рис. 2, точка перегиба кривой восходящей части реограммы четко определяется по максимуму первой производной. Однако этот момент соответствует окончанию малой волны на ЭКГ, располагающейся перед волной T. Это и есть местоположение точки j. В литературе указывается лишь на приблизительное ее местоположение.

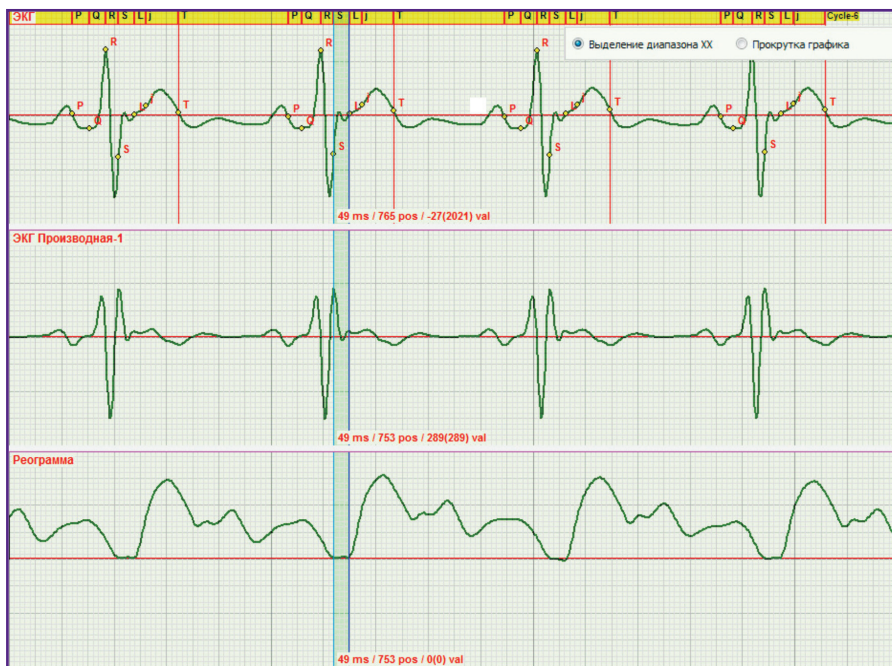


Рис. 1. Синхронно записанные ЭКГ и реограмма

Начало открытия клапана аорты соответствует началу фазы быстрого изгнания. Для отображения этого момента на ЭКГ введено новое обозначение — точка L



Рис. 2. Синхронно записанные ЭКГ и реограмма

Точка j соответствует точке перегиба восходящей части графика реограммы и определяется по максимуму первой производной реограммы. Это соответствует концу второй малой волны ЭКГ перед точкой T

Подставляя длительности фаз SL и Lj в уравнение гемодинамики Г. Поединцева и О. Вороновой, мы получили фазовые систолические объемы крови, сумма которых была равна сумме диастолических объемов.

Дальнейшие исследования полностью подтвердили, что использование критериев фиксации фаз SL и Lj соответствует действительности и отмеченное выше равенство выдерживается с высокой точностью в 100% случаев.

Результаты и обсуждение

Главным результатом работы явилось установление критериев регистрации границы фаз быстрого и медленного изгнания в фазовой структуре сердечного цикла. Вторым важным результатом стало точное описание местоположения точки j.

Работа отражает возможности классических научных подходов к исследовательской практике. Оказалось достаточным использование одного канала регистрации ЭКГ. При этом важно отметить, что этот канал регистрирует сигнал в аорте, процессы в которой служат показателем всей деятельности сердечно-сосудистой системы [9]. Кроме того, было важным сопоставить фазовые соотношения ЭКГ и реограмму аорты.

Ранее [9] также использовалась регистрация ЭКГ и реограммы, но это было многоканальное отведение ЭКГ и реография грудной клетки, которая охватывает процессы кровенаполнения всех органов грудной клетки. Без знания точного расположения одной из ключевых точек S синхронизация реограммы проводилась путем фиксации ее минимума к изолинии. В настоящей работе изолиния реограммы фиксировалась в точке, соответствующей точке S [9]. Точное определение положения точки S позволило анализировать механизм регулировки диастолического артериального давления с помощью реографии. Он оценивался наличием или отсутствием кровенаполнения по графику реограммы до точки S (рис. 3). Ранее было невозможно это делать.

На рис. 3 приведен процесс

подъема графика реограммы до точки S. Сравнение с рис. 1 и 2 показывает, что в данном случае наблюдается проникновение крови через закрытый клапан аорты. Если бы реограмма своим минимумом была фиксирована к изолинии, затруднительно было бы оценить наличие этого подъема, который является критерием серьезных изменений в работе клапана аорты.

Новые возможности открываются и в оценке фаз быстрого и медленного изгнания. На рис. 4 видно, что в фазе Lj отсутствует рост реограммы. Это имеет важные клинические последствия: указывается на невозможность формирования структуры кровотока, обладающего свойствами повышенной текучести [9]. Результатом может стать тромбообразование крупных кровеносных сосудов.



Рис. 3. Возможность качественной оценки изменения кровенаполнения аорты при закрытом клапане аорты

Подъем графика реограммы до точки S указывает на поступление объемов крови в аорту через закрытый клапан аорты

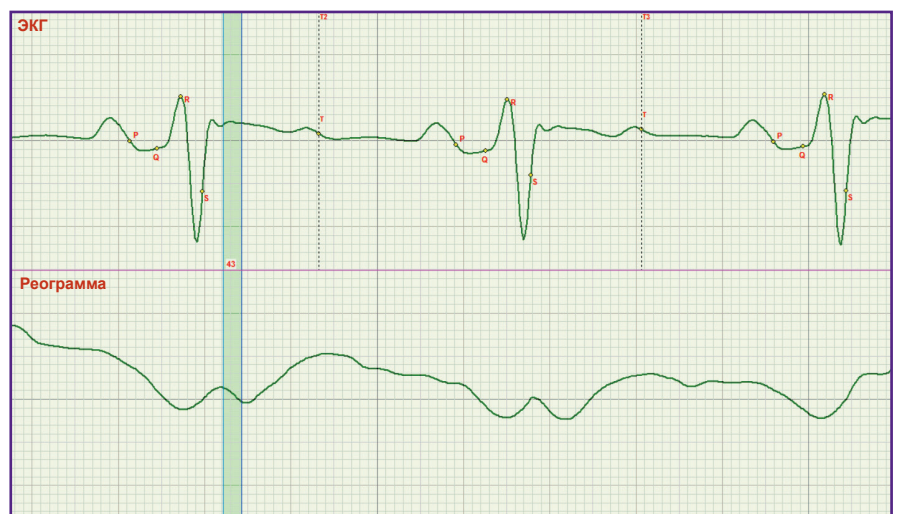


Рис. 4. Отсутствие нормального развития фазы быстрого изгнания

В выделенной фазе быстрого изгнания график реограммы имеет отрицательный наклон

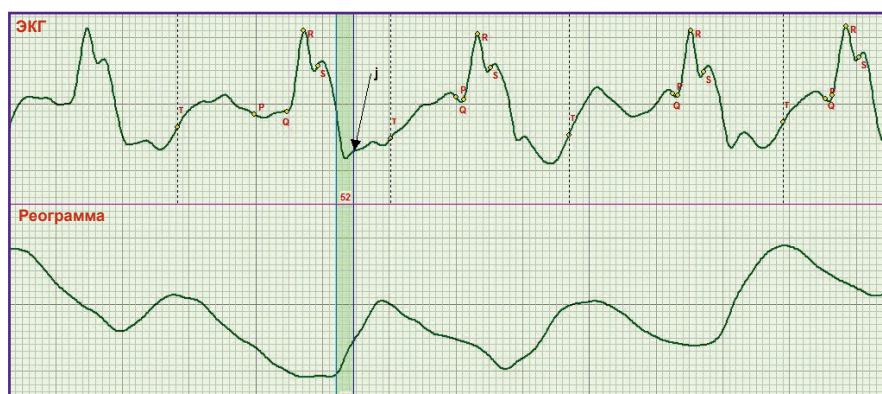


Рис. 5. Расположение точки j соответствует концу фазы быстрого изгнания, выделенной на рисунке стрелкой (это проверяется соответствием середине переднего фронта реограммы)

По-новому можно взглянуть и на определение волны Осборна. На рис. 5 представлена запись ЭКГ, соответствующая наличию этой волны. Однако необходимо разделять понятия «волны» и «точки». Точка j соответствует концу фазы быстрого изгнания, что на рис. 5 выделено вертикальной полосой. Это середина подъема графика реограммы, а волна Осборна находится слева от фазы.

Заключение

Фазовый анализ сердечного цикла, основанный на математических моделях гемодинамики Г. Поединцева, О. Вороновой, позволил снять завесу непознанного с ЭКГ, которая скрывала структуру трех систолических фаз сердечного цикла: напряжения, быстрого и медленного изгнания. Без сомнения, результаты работы позволят дополнить и уточнить существующие понятия в электрокардиографии [12–18].

Понимание механизма формирования этих фаз даст возможность специалистам иметь ключ к познаниям пока не известных механизмов функционирования сердечно-сосудистой системы, которая хранит еще много тайн. Их разгадка приблизит нас к созданию искусственного сердца.

Финансирование исследования и конфликт интересов. Исследование не финансировалось какими-либо источниками, и конфликты интересов, связанные с данным исследованием, отсутствуют.

Литература/References

1. Kligfield P., Gettes L.S., Bailey J.J., Childers R., Deal B.J., Hancock E.W., van Herpen G., Kors J.A., Macfarlane P., Mirvis D.M., Pahlm O., Rautaharju P., Wagner G.S., Josephson M., Mason J.W., Okin P., Surawicz B., Wellens H.; American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; American College of Cardiology Foundation; Heart Rhythm Society. Recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part I: the electrocardiogram and its technology a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *J Am Coll Cardiol* 2007; 49(10): 1109–1127, <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2007.01.024>.
2. ECG learning centre. URL: <http://ecg.utah.edu>.
3. Иванов Г.Г. *Электрокардиография высокого разрешения*. М: Триада-Х; 1999; 280 с.
Ivanov G.G. *Elektrokardiografiya vysokogo razresheniya* [High resolution electrocardiography]. Moscow: Triada-X; 1999; 280 p.
4. Gussak I., Bjerregaard P., Egan T.M., Chaitman B.R. ECG phenomenon called the J wave: history, pathophysiology, and clinical significance. *J Electrocardiol* 1995; 28(1): 49–58, [https://doi.org/10.1016/s0022-0736\(05\)80007-x](https://doi.org/10.1016/s0022-0736(05)80007-x).
5. Kalla H., Yan G.X., Marinchak R. Ventricular fibrillation in a patient with prominent J (Osborn) waves and ST segment elevation in the inferior electrocardiographic leads: a Brugada syndrome variant? *J Cardiovasc Electrophysiol* 2000; 11(1): 95–98, <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2000.tb00743.x>.
6. Marayama M., Atarashi H., Ino T., Kishida H. Osborn waves associated with ventricular fibrillation in a patient with vasospastic angina. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2002; 13(5): 486–489, <https://doi.org/10.1046/j.1540-8167.2002.00486.x>.
7. Yan G.X., Antzelevitch C. Cellular basis for the electrocardiographic J wave. *Circulation* 1996; 93(2): 372–379, <https://doi.org/10.1161/01.cir.93.2.372>.
8. Serafinovich I.A., Karnaliuk D. “Invisible areas” of anterior wall of the left ventricle. *J of Coronary Artery Disease* 2007; 7(1): 148.
9. Rudenko M.Y., Voronova O.K., Zernov V.A., Mamberger K.K., Makedonsky D.F., Rudenko S.M. *Theoretical principles of heart cycle phase analysis*. Fouqué Literaturverlag. Frankfurt a/M. München–London–New York.
10. Руденко С.М. *Разработка принципов построения системы для диагностики функции клапана аорты*. Дис. ... канд. техн. наук. Таганрог; 2009.
Rudenko S.M. *Razrabotka printsipov postroeniya sistema dlya diagnostiki funktsii klapana aorty*. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of principles for constructing a system for diagnosing aortic valve function. PhD Thesis]. Taganrog; 2009.
11. Мамбергер К.К. *Разработка методов и средств повышения достоверности измерения длительности фазы быстрого изгнания в структуре сердечного цикла*. Дис. ... канд. техн. наук. Таганрог; 2012.
Mamberger K.K. *Razrabotka metodov i sredstv povysheniya dostovernosti izmereniya dlitel'nosti fazy bystrogo izgnaniya*

v strukture serdechnogo tsikla. Dis. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods and means of increasing the reliability of measuring the duration of the phase of rapid expulsion in the structure of the cardiac cycle. PhD Thesis]. Taganrog; 2012.

12. Rudenko M.Y., Voronova O.K., Zernov V.A., Mamberger K.K., Makedonsky D.F., Rudenko S.M. Theoretical principles of cardiometry. *Cardiometry* 2012; 1: 7–23, <https://doi.org/10.12710/cardiometry.2012.1.723>.

13. Jalife J., Delmar M., Anumonwo J., Berenfeld O., Kalifa J. *Basic cardiac electrophysiology for the clinician*. Wiley-Blackwell; 2009, <https://doi.org/10.1002/9781444316940>.

14. Zipes D.P., Jalife J. *Cardiac electrophysiology: from cell to bedside*. Saunders; 2009.

15. Sclarovsky S., Nikus K. The electrocardiographic

paradox of Tako-Tsubo cardiomyopathy — comparison with acute ischemic syndromes and consideration of molecular biology and electrophysiology to understand the electrical-mechanical mismatching. *J Electrocardiol* 2009; 43(2): 173–176, <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2009.07.015>.

16. *Dynamic electrocardiography*. Camm A.J., Malik M. (editors). Blackwell Publishing; 2004, <https://doi.org/10.1002/9780470987483>.

17. *Basic electrocardiology: cardiac electrophysiology, ECG systems and mathematical modeling*. Macfarlane P.W., van Oosterom A., Janse M., Kligfield P., Camm J., Pahlm O. (editors). Springer; 2012.

18. *Specialized aspects of ECG*. Macfarlane P.W., van Oosterom A., Janse M., Kligfield P., Camm J., Pahlm O. (editors). Springer; 2012.