

## АНАЛИЗ СПЕКТРА СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПО ДАННЫМ ФОТОПУЛЬСОГРАММЫ

<sup>1,2</sup>Кокодий Н.Г., <sup>2</sup>Тиманюк В.А., <sup>3</sup>Измайлов Д.Ю.

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина,  
Украина, г. Харьков, пл. Свободы, 4, e-mail: kokodiy.n.g@gmail.com;

<sup>2</sup>Национальный фармацевтический университет,  
61002 Украина, г. Харьков, ул. Пушкинская, 53, e-mail: fizika@ukrfa.kharkov.ua;

<sup>3</sup>ООО «ДИСофт»,  
119991 Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, владение 1, строение 77, e-mail: soft@powergraph.ru

*Фотопульсограмма, полученная с помощью пары светодиод-фотодиод, и компьютерный анализ ее спектра дают информацию о состоянии сердечно-сосудистой системы. Фотопульсометрия технически проще электрокардиографии, с помощью которой эти задачи традиционно решаются, и поэтому имеет хорошие перспективы для внедрения в современную медицину.*

**Ключевые слова:** сердечный ритм, пульсограмма, спектр, индекс централизации, индекс активации подкорковых нервных центров.

### Введение

Реакцией организма на любое воздействие внешней среды является изменение ритма сердца. Однако традиционно измеряемая средняя частота сердечных сокращений (пульс, количество сокращений в 1 минуту) отражает лишь конечный результат многих регуляторных влияний на аппарат кровообращения; одну и ту же частоту пульса могут давать многие комбинации ответных реакций организма. Поэтому для более глубокого исследования работы сердца и оценки состояния организма используются также измерение артериального давления крови, регистрация электрокардиограммы (ЭКГ) и др. методы

Информативным методом оценки параметров сердечного ритма является измерение частоты сердечных сокращений (ЧСС) в течение продолжительного времени и математический анализ ее вариации. Считается, что такой анализ позволяет количественно оценить активность различных отделов вегетативной нервной системы. Динамика показателей вариации сердечного ритма в ряде случаев опережает изменения клинко-лабораторных, рентгенологических, электрокардиографических и других данных, свидетельствующих о возникновении патологии, состояния декомпенсации и т. п. Метод диагностики по вариации сердечного ритма изложен в работах Баевского Р.М. и других [2, 3, 7, 8, 9, 10, 11].

Зависимость ЧСС от времени (кардиоинтервалограмму, пульсограмму) можно получить из ЭКГ. Другим способом является измерение оптической плотности некоторых участков тела человека (пальца, мочки уха) с помощью пары светодиод-фотодиод. Между этой парой помещается верхняя фаланга пальца руки. Во время пульсового притока крови пропускание света уменьшается, и это регистрируется фотодиодом. Такая методика используется А.С.Парфеновым (ООО «Ангиоскан-электроникс», Москва) [4, 12]. Этот сигнал служит основой для получения кардиоинтервалограммы.

В экспериментах, проведенных авторами настоящей статьи, между светодиодом и фотодиодом помещалась перепонка между большим и указательным пальцами руки.

### Спектральный анализ

Блок-схема эксперимента показана на рис. 1.

Источником света служил светодиод СД белого света Р9СW2Р с мощностью излучения около 30 мВт с блоком питания БП, фотоприемником – фотодиод ФД-256. Сигнал с фотодиода через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа Е14-140 вводился в компьютер ПК. Для обработки сигналов использовалась программа PowerGraph (ООО «ДИСофт», г. Москва).

На рис. 2 показан вид сигнала с фотодиода. Период следования импульсов равен 860 мс. На

спаде импульсов виден небольшой максимум, связанный с отражением пульсовой волны на разветвлении кровяного тракта.

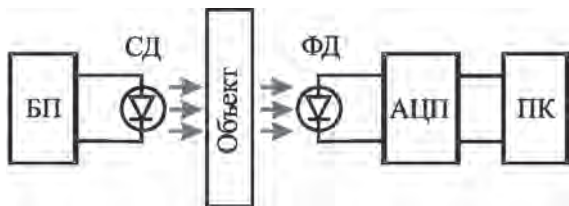


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для фотопульсометрии.

На рис. 3 показан амплитудный спектр фотопульсограммы человека, находящегося в состоянии покоя. Запись данных длилась 3 мин. Хорошо видна частота основного колебания с частотой 1,16 Гц (70 ударов сердца в минуту), а также присутствие высших гармоник с удвоенной, утроенной частотой и другими кратными частотами.

На рис. 4 показан амплитудный спектр фотопульсограммы того же человека после некоторой физической нагрузки (30 приседаний). Спектральные линии сдвинулись в сторону вы-

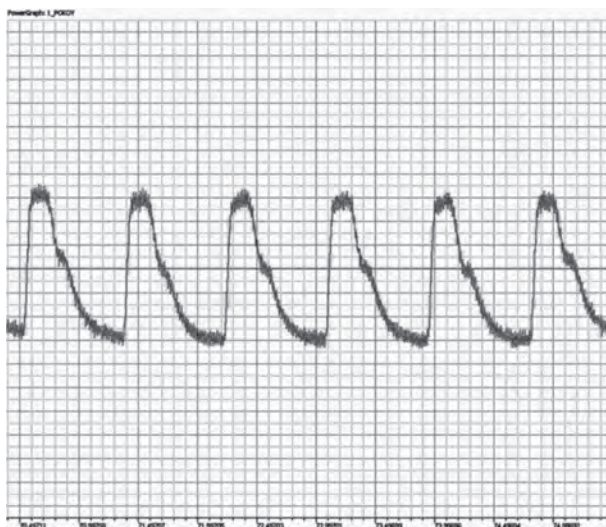


Рис. 2. Сигнал с фотодиода

соких частот (пульс стал более частым). Видно также и их уширение, что связано с непостоянством ЧСС в течение трехминутного измерения после завершения серии приседаний.

На рис. 5, видно, что после нагрузки частота пульса (толстая линия) постепенно возвращается к уровню, характерному для состояния покоя (тонкая линия). Время восстановления нормальной частоты пульса – одна из характеристик состояния организма: у здоровых, хорошо тренированных людей ЧСС при нагрузке быстро увеличивается, а после снятия нагрузки так же быстро приходит в норму.

В литературе, посвященной анализу ЭКГ, низкочастотным (по сравнению с ЧСС) колебаниям пульсограммы придается особый диагностический смысл [2, 3, 6]. В этой области частот принято выделять несколько областей.

1. Высокие частоты (High Frequency – HF) - от 0,4 Гц до 0,1 Гц (длительность периода от 2,5 до 10 секунд), которые, как считают, являются отражением согласования дыхательной и сердечной

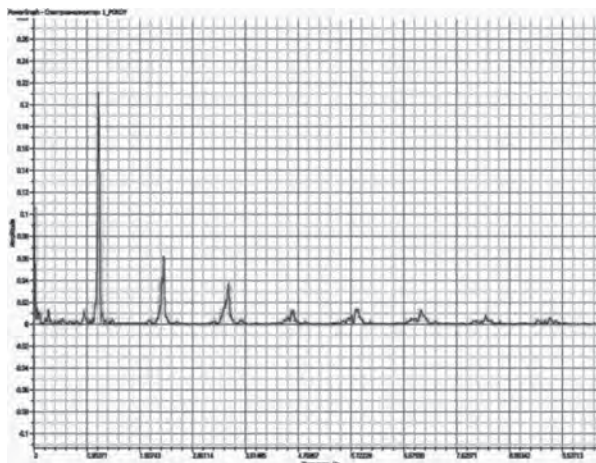


Рис. 3. Амплитудный спектр фотопульсограммы (покой)

деятельности и поэтому называются также «дыхательными волнами» или синусовой дыхательной аритмией.

2. Низкие частоты (Low Frequency – LF) - от 0,1 до 0,04 Гц (длительность периода от 10 до 25 секунд). Они называются также медленными волнами 1-го порядка и характеризуют, по мне-

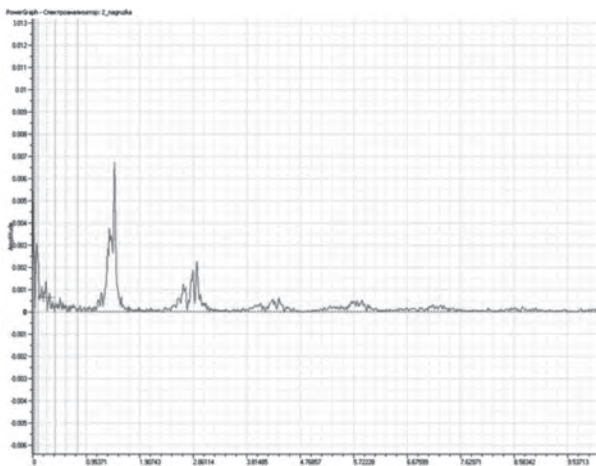


Рис. 4. Спектр фотопульсограммы (после нагрузки)

нию вышеуказанных авторов, состояние системы регуляции сосудистого тонуса.

3. Очень низкие частоты (Very Low Frequency – VLF) - от 0,04 до 0,015 Гц (длительность периода

от 25 до 65 секунд). Они называются также медленными волнами 2-го порядка; предполагается, что эти волны характеризуют активность симпатических центров, контролируемых более высокими уровнями регуляции.

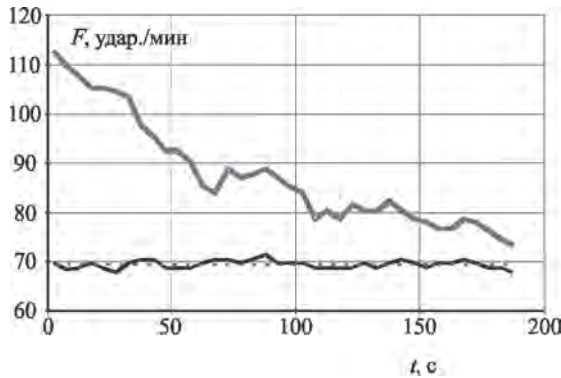


Рис. 5. Изменение частоты пульса после физической нагрузки (толстая линия). Тонкая линия – ЧСС в покое за аналогичный промежуток времени

По данным спектрального анализа пульсограммы вычисляют два индекса [2, 3]:

1. Индекс централизации

$$ИЦ = \frac{P_{LF} + P_{VLF}}{P_{HF}}$$

Он предложен для оценки того, насколько более мощной является активность центрального контура по отношению к автономному.

2. Индекс активации подкорковых нервных центров

$$ИАЦП = \frac{P_{VLF}}{P_{LF}}$$

Он, как считают, указывает на активность внутрисистемного уровня по отношению к более высоким уровням регуляции ритма сердца.

Величины, входящие в эти формулы, вычисляются так:

$$P_{HF} = \int_{f_{HF\ min}}^{f_{HF\ max}} S(f) df,$$

$$P_{LF} = \int_{f_{LF\ min}}^{f_{LF\ max}} S(f) df,$$

$$P_{VLF} = \int_{f_{VLF\ min}}^{f_{VLF\ max}} S(f) df.$$

Здесь  $f$  – частота, отложенная по горизонтальной оси на графиках рис. 3, рис. 4 и ниже – на рис. 6 и рис. 7,  $S(f)$  – функция, отложенная на графиках по вертикальной оси. Пределы интегрирования соответствуют границам диапазонов HF, LF и VLF.

На рис. 6 показана низкочастотная часть спектра фотопульсограммы человека в состоянии покоя. Видны области HF, LF и VLF с нанесенными на них горизонтальными штриховыми линиями на уровне средних значений функции в этих областях.

Значения функции по областям для состояния покоя, полученные численным интегрированием цифровых данных о соответствующих спектров, получились следующими:

$$\frac{P_{HF}}{P_{\Sigma}} = 17\%, \quad \frac{P_{LF}}{P_{\Sigma}} = 38\%, \quad \frac{P_{VLF}}{P_{\Sigma}} = 36\%,$$

где  $P_{\Sigma}$  – общая мощность.

Значения индексов получились такими:  $ИЦ = 4,35$ ,  $ИАЦП = 0,95$ . В рамках вышеописанного подхода первый из них показывает, что активность центрального контура в 4 раза превышает активность автономного контура. Значение

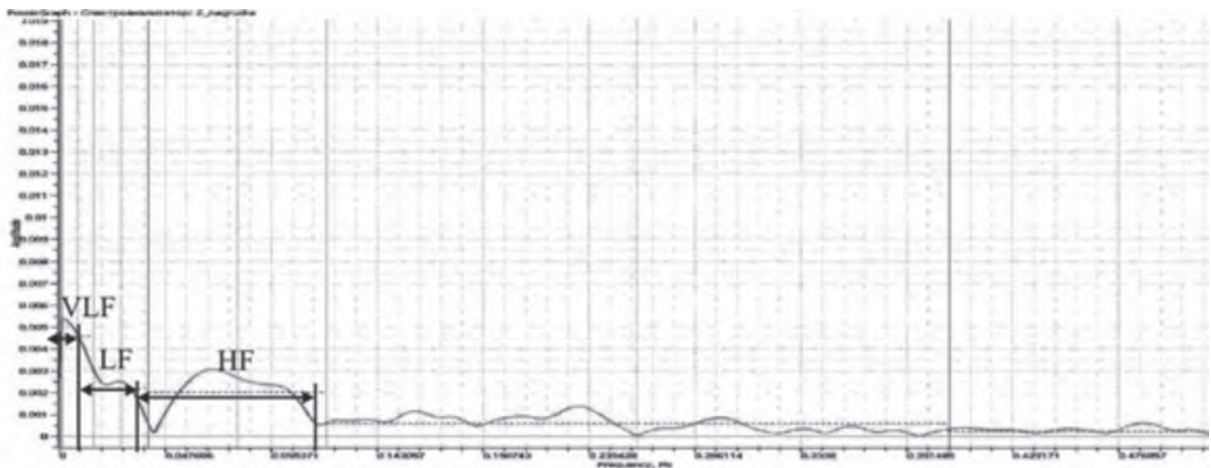


Рис. 6. Низкочастотная часть спектра фотопульсограммы (покой)

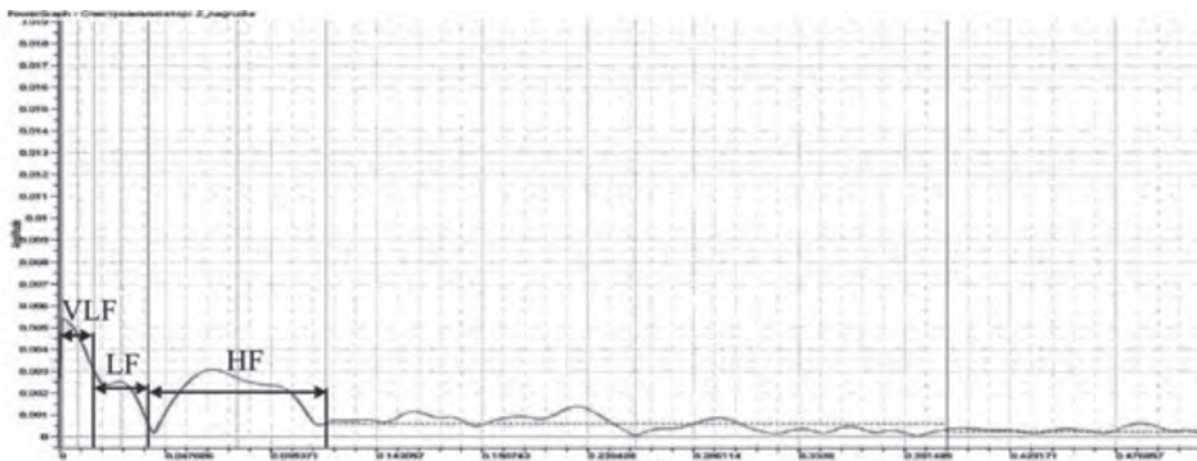


Рис. 7. Низкочастотная часть спектра фотопульсограммы (после нагрузки)

второго индекса показывает, что активности внутрисистемного уровня регуляции ритма сердца и более высокого уровня регуляции примерно одинаковы.

На рис. 7 показана низкочастотная часть спектра фотопульсограммы после нагрузки. Как видно, имел место рост среднего уровня функции в области LF. Соотношение мощностей различных областей здесь такое:

$$\frac{P_{HF}}{P_{\Sigma}} = 18\%, \quad \frac{P_{LF}}{P_{\Sigma}} = 58\%, \quad \frac{P_{VLF}}{P_{\Sigma}} = 21\%$$

Значение ИЦ после нагрузки изменилось мало, тогда как значение ИАЦП (0,36) существенно снизилось показывает, что выросла роль высоких уровней регуляции ритма сердца.

### Кепстральный анализ

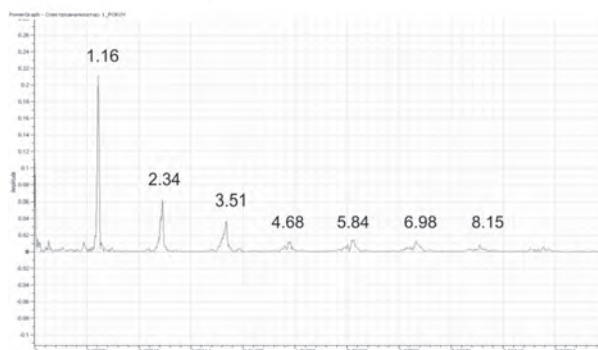
В последнее время получил распространение еще один вид математического анализа периодических сигналов – кепстральный анализ [1, 5].

Спектр - это компактное численное представление периодичностей, присутствующих в

сигнале. Из достоинств спектрального представления информации родилась идея кепстрального анализа. В спектре ось частоты заменяется на ось времени. Определив спектр этого «сигнала» (его и назвали «кепстр»), можно легко определить невидимые явным образом периодичности в этом «сигнале». А присутствующие в исходном спектре периодичности есть не что иное, как гармонические ряды. Таким образом, появляется возможность представить исходную спектральную информацию еще более компактно: каждый гармонический ряд исходного спектра будет представлен всего одной составляющей в кепстре. Принято считать, что кепстр - это спектр логарифма спектра исходного сигнала, т. е. первоначальный спектр должен быть представлен в логарифмическом масштабе. Логарифмирование не имеет отношения к существу метода. Оно применяется, чтобы получившийся график кепстра содержал только самые существенные линии.

Применявшееся в наших экспериментах для обработки сигнала фотопульсограммы программное обеспечение дает возможность выполнять не

### Спектр



### Кепстр

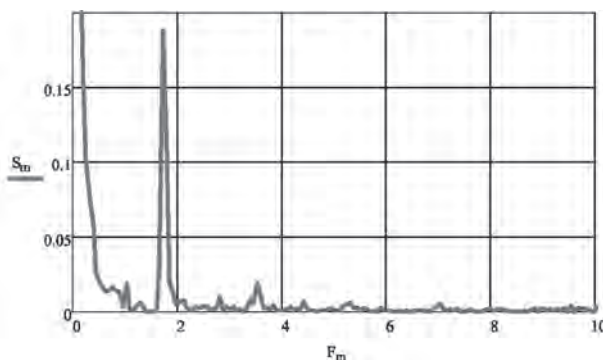


Рис. 8. Спектр и кепстр фотопульсограммы (покой)

только спектральный, но и кепстральный анализ исходных данных. На рис. 8 сравниваются спектр и кепстр фотопульсограммы. В спектре хорошо виден ряд гармоник; в кепстре им соответствует один высокий пик.

### Заключение

Таким образом, фотопульсометрия дает возможность определять основные параметры вариации сердечного ритма математическими метода-

ми, применяемыми при анализе ЭКГ и кардиоинтервалограмм. Фотопульсометрия технически проще, поскольку не требуется усиливать слабые электрические сигналы, не нужно измерять длины RR-интервалов ЭКГ, для чего необходима предварительная обработка сигналов. Для оценки перспективности внедрения в практическую медицину фотопульсометрии с компьютерным анализом спектра сердечного ритма необходимо проведения дальнейших исследований.

### Литература

1. Андреевская Т.М. Кепстральный анализ // РЭ. – МГИЭМ. – 2004. – 238 с.
2. Баевский Р.М. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе / Р.М.Баевский, О.И.Кириллов, С.З.Клецкин. - М.: Наука, 1984.- 220 с.
3. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии.- М.: Медицина, 1979.– 295 с.
4. Парфенов А.С. Экспресс-диагностика сердечно-сосудистых заболеваний // Мир измерений.– 2008.- №6.– С.74-82. www.powergraph.ru/soft/pub.asp
5. Суворов В.Н. О кепстральном анализе в популярной форме // ПиКАД.– 2006.- №4.– С.52-53.
6. Флейшман А.Н. Медленные колебания гемодинамики.– Новосибирск, 1999.– 264 с.
7. Хаспекова Н.Б. Регуляция вариативности ритма сердца у здоровых и больных с психогенной и органической патологией мозга. Дис. ... докт. мед. наук.- М., Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, 1996.- 236 с.
8. Akselrod S. Power spectrum analysis of heart fluctuation: a quantitative probe of beat to beat cardiovascular control / S.Akselrod, D.Gordon, F.A.Ubel et al. // Science.- 1981.- Vol.213.- P.220-222.
9. Malliani A. Power spectral analysis of heart rate variability: atool to explore neural regulatory mechanisms / A.Malliani, F.Lombardi, M.Pagani // Brit. Heart J.- 1994.- Vol.71.- P.1-2.
10. Pomeranz M. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis / M.Pomeranz, R.J.B.Macaulay, M.A.Caudill // Amer. J. Physiology.- 1985.- Vol.246.- P.151-153.
11. Sayers B.M. Analysis of heart rate variability // Ergonomics.- 1973.- Vol.16, №1.- P.17-32.
12. www.angioscan.ru

### АНАЛІЗ СПЕКТРА СЕРЦЕВОГО РИТМУ ЗА ДАНИМИ ФОТОПУЛЬСОГРАММИ

<sup>1,2</sup> Кокодій М.Г., <sup>2</sup>Тіманюк В.А., <sup>3</sup>Ізмайлов Д.Ю.

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна,  
Україна, м. Харків, пл. Свободи, 4, e-mail: kokodiy.n.g@gmail.com;

<sup>2</sup>Національний фармацевтичний університет,  
61002 Україна, м. Харків, вул. Пушкінська, 53, e-mail: fizika@ukrfa.kharkov.ua;  
ЗООО « ДІСофт »,  
119991 Росія, м. Москва, вул. Ленінські гори, володіння 1, будова 77, e-mail: soft@powergraph.ru

Фотопульсограма, отримана за допомогою пари світлодіод - фотодіод, та комп'ютерний аналіз її спектра дають інформацію про стан серцево-судинної системи. Фотопульсометрія технічно простіше електрокардіографії, за допомогою якої ці завдання традиційно вирішуються, і тому має хороші перспективи для впровадження в сучасну медицину.

**Ключові слова:** серцевий ритм, пульсограми, спектр, індекс централізації, індекс активації підкіркових нервових центрів.

**ANALYSIS OF THE HEART RHYTHM SPECTRUM**

<sup>1,2</sup>Kokodiy N.G., <sup>2</sup>Timanyuk V.A., <sup>3</sup>Izmaylov D.Y.,

<sup>1</sup>V.N.Karazin Kharkiv National University, Kharkov, Ukraine, pl. Liberty, 4, e-mail: kokodiy.n.g@gmail.com;

<sup>2</sup>National Pharmaceutical University,  
61002 Kharkov, Ukraine, ul. Pushkinskaya, 53, e-mail: fizika@ukrfa.kharkov.ua;

<sup>3</sup>ООО « DISoft »  
119991, Russia, Moscow, ul. Lenin Hills, possession 1, Building 77, e-mail: soft@powergraph.ru

*Photopulsogram, obtained by using a pair of LED-photodiode, and computer analysis of its spectrum give information about the state of the cardiovascular system. Photopulsometry is technically simpler compare with electrocardiography (is traditionally used for solution of these tasks), and therefore has good perspectives for the introduction in modern medicine.*

**Keywords:** heart rhythm, pulsogram, spectrum, centralization index, index of subcortical activation of nerve centers.