

С. М. Захаров¹, Г. Г. Знайко¹¹ ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ

Представлен спектральный анализ электрокардиографических (ЭКГ) сигналов с целью возможного расширения диагностики функциональных состояний. Проводится сравнительный анализ на качественном уровне спектральных методов исследований сигналов ЭКГ с методами фотоплетизмографии (ФПГ). Обсуждаются явления упорядоченности и разупорядоченности в спектрах Фурье ЭКГ.

Ключевые слова: спектральный анализ, электрокардиограмма, фотоплетизмограмма, спектральное разрешение.

Введение

Как известно, спектральный анализ представляет собой довольно тонкий инструмент исследований. Не случайно существует спектроскопия высокого и даже сверхвысокого разрешения. В настоящей работе представлен спектральный анализ электрокардиографических сигналов с целью возможного расширения диагностики функциональных состояний.

Основной тенденцией современного этапа развития методов функциональной диагностики является получение максимальной информации при минимальном воздействии на организм пациента. Регистрация и анализ сигналов электрической активности миокарда представляет собой ключевой метод неинвазивного исследования и диагностики, используемый сегодня в кардиологии. Современная функциональная диагностика располагает самыми разнообразными методами, среди которых самым распространенным остается метод регистрации электрокардиограмм, в т.ч. высокого разрешения (ЭКГ ВР) [1]. Кроме того, получили распространение методы картирования и построения изображений, статистические методы исследований, составляющие основу метода вариабельности сердечного ритма (ВСР) [2]. В методе ВСР спектральные методы исследований в основном используются применительно к кардиоинтервалам, что позволяет проводить изучение особенностей вегетативной нервной системы [3]. Получили развитие спектральные методы диагностики [4–7], в т.ч. нестационарные, основанные на оконном преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании [8–11].

В настоящей работе проводится сравнительный анализ на качественном уровне спектральных методов исследований ЭКГ в целом в сравнении с методами ФПГ. Обсуждаются явления упорядоченности

и разупорядоченности в спектрах Фурье ЭКГ. Отметим, что все представленные расчеты выполнены в среде Maple 5v4.

Спектроскопия сигналов ЭКГ

Поскольку регистрация сигналов ЭКГ весьма чувствительна к различного рода факторам (качеству электрических контактов, сетевым наводкам, актам дыхания и др.), то в качестве исходных данных было решено использовать каталоги различных баз данных, составленных в различное время в разных институтах. В частности, были задействованы базы данных Института Американских Национальных Стандартов (ANSI/AAMI EC13), Апноэ ЭКГ (Apnea ECG Database) и Американской Ассоциации Сердца (American Heart Association – AHA Database) [12]. При этом выбирались цифровые файлы в формате *.txt*, относящиеся к десятисекундной и минутной записям.

Анализ спектров сигналов ЭКГ начнем с файла a04, взятого из базы данных Апноэ ЭКГ [12]. Данная запись иллюстрирует явление внезапной остановки дыхания (апноэ) во время сна, часто встречающееся у взрослого мужского населения. Апноэ рассматривается как независимый фактор риска наряду с ишемическими сердечными приступами и инсультами. Раннее распознавание расстройств сна, связанных с дыханием, является важной задачей. Высказывалось предположение, что это можно делать на основании ЭКГ.

Для апноэ характерно прекращение дыхания во время сна более чем на 10 секунд. Чаще оно длится 20–30 секунд, хотя в тяжелых случаях может достигать 2–3 минут и занимать до 60% общего времени ночного сна. При регулярных приступах апноэ (обычно не менее 10–15 в течение часа) может возникнуть ухудшение памяти и интеллекта, снижение работоспособности и усталость.

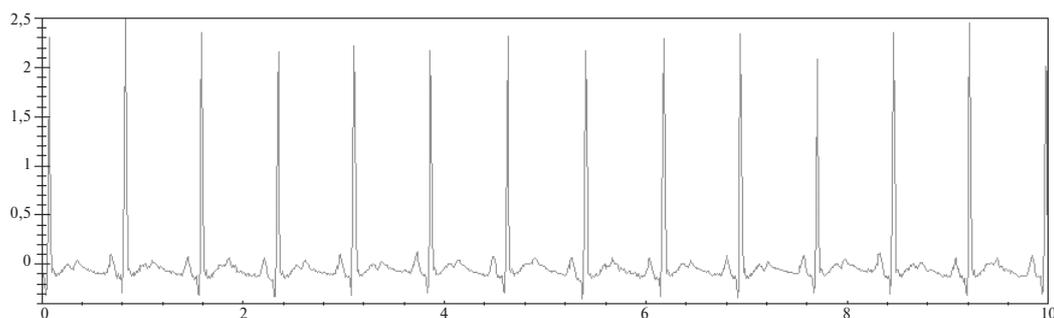


Рисунок 1. Десятисекундная запись апноэ ЭКГ (по оси абсцисс – время в секундах)

Представленная на рис. 1 электрокардиограмма записана с частотой дискретизации 100 Гц (период сердечного цикла – $\sim 0,76$ с, пульс – 79 уд./мин), видна отчетливая PQRST-структура зубцов.

Спектрограмма на рис. 2 представляет собой довольно регулярную упорядоченную структуру с частотами, кратными основной частоте 1,3 Гц. Имеется некоторое размытие каждого частотного пика, однако спектральное разрешение в 0,1 Гц позволяет рассмотреть определенную тонкую структуру спектра.

Минутная запись ЭКГ принципиально ничем не отличается от десятисекундной, за исключением лучшего спектрального разрешения, составляющего в данном случае $\sim 0,02$ Гц (рис. 3). Можно заметить существенное отличие спектрограмм на рис. 2 и 3 от спектров Фурье ФПГ. Из-за резких временных фронтов зубца QRS ($< 0,1$ с) спектральная область ЭКГ гораздо шире области ФПГ. Кроме того, и затухание высокочастотных компонент спектра ЭКГ проявляется более медленно по сравнению с затуханием спектра ФПГ.

О большой ширине спектральной области ЭКГ также говорят временные и спектральное представления одиночного сердцебиения (рис. 4).

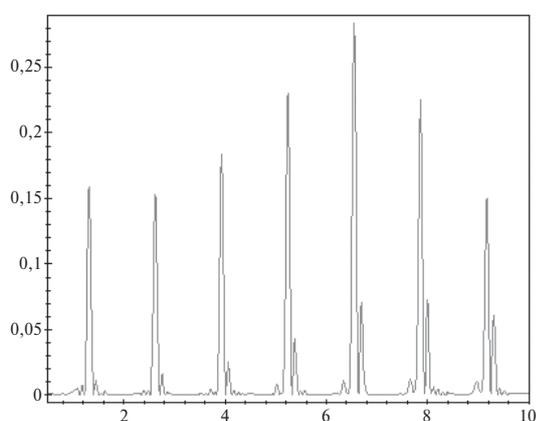


Рисунок 2. Апноэ ЭКГ в спектральном представлении (по оси абсцисс – частота в Гц)

Здесь спектральное разрешение составляет $\sim 1,3$ Гц.

Рассмотрим базу данных Американской Ассоциации Сердца – АНА. АНА была создана совместно с Национальным Институтом Сердца, Легких и Крови (National Heart, Lung, and Blood Institute – NHLBI) для оценки желудочковой аритмии. На рис. 5 показана десятисекундная запись ЭКГ (файл 0201) [12]. Запись ЭКГ сделана с частотой дискретизации 250 Гц. Период сердечного цикла при этом составляет 0,83 с, основная частота – 1,2 Гц. Особенность ЭКГ на рис. 5 состоит в «плавающей» изолинии.

Очевидно, что данный спектр по сравнению со спектром ЭКГ на рис. 3 не так упорядочен. Сравнение спектрограмм на рис. 6 и 7 позволяет говорить о разупорядоченности, проявляющейся в возникновении общей хаотизации. Таким образом, о степени разупорядоченности (или упорядоченности) спектров необходимо судить при наличии достаточно протяженных записей ЭКГ (в нашем случае – не менее минутной).

Рассмотрим теперь файл *aami3a* из базы данных Института Американских Национальных Стандартов – ANSI/AAMI EC13 (рис. 8) [12]. Данный файл описывает явление желудочковой бигеминии, связанное с возникновением определенного вида

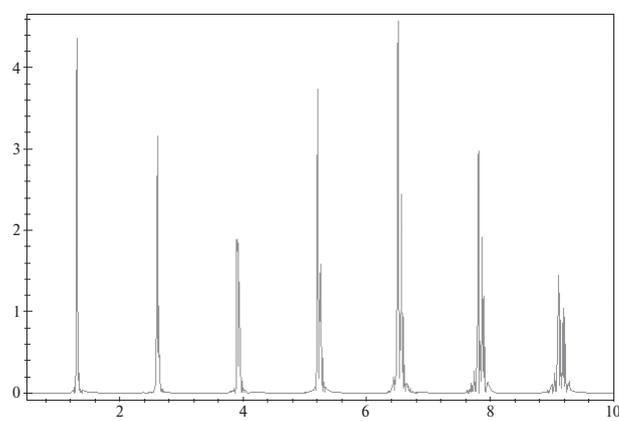
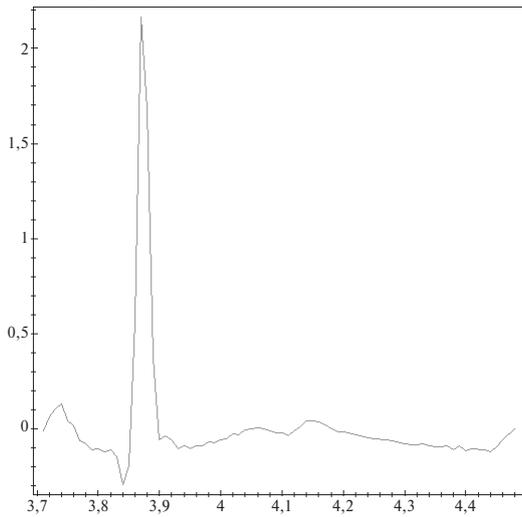
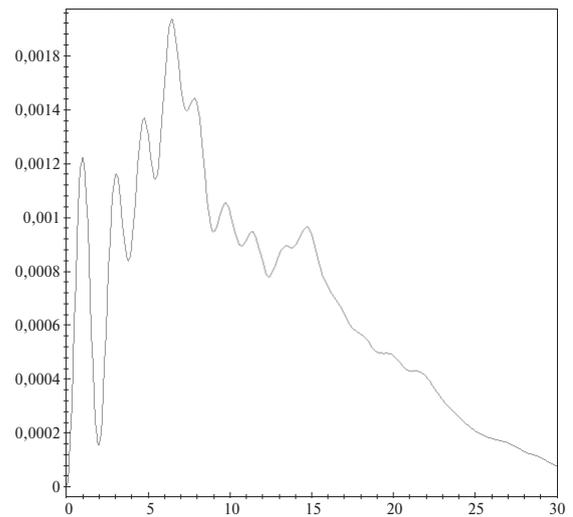


Рисунок 3. Спектральное представление минутной записи ЭКГ в диапазоне до 10 Гц



а)



б)

Рисунок 4. Одиночное сердцебиение во временном (а) и спектральном (б) представлениях

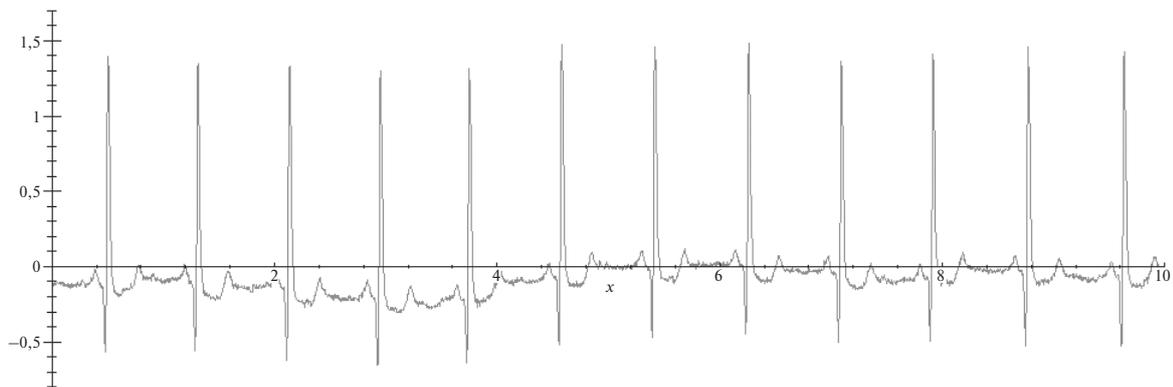


Рисунок 5. Десятисекундная запись ЭКГ АНА

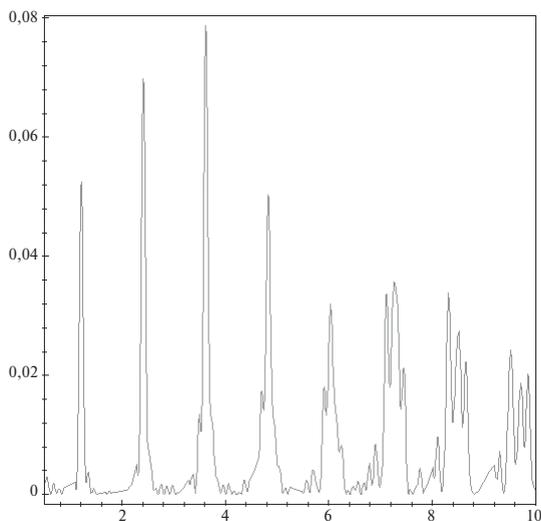


Рисунок 6. Спектральное представление десятисекундной записи ЭКГ с частотным разрешением $\sim 0,1$ Гц (по оси абсцисс – частота в Гц)

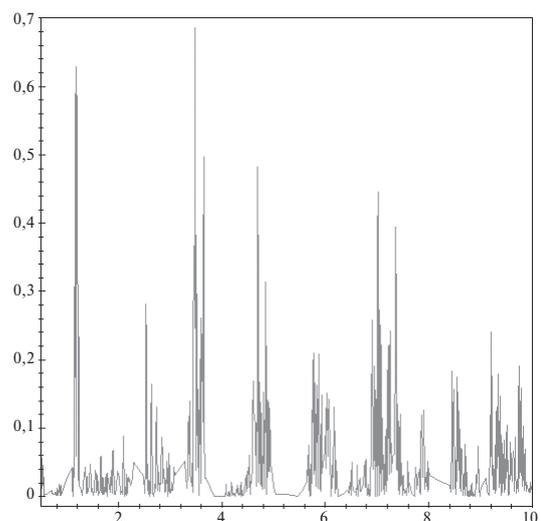


Рисунок 7. Спектральное представление минутной записи ЭКГ с частотным разрешением $\sim 0,02$ Гц

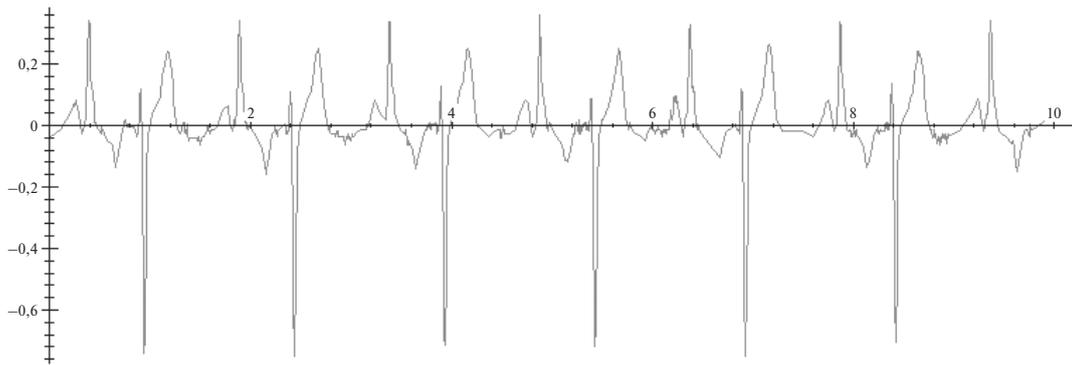
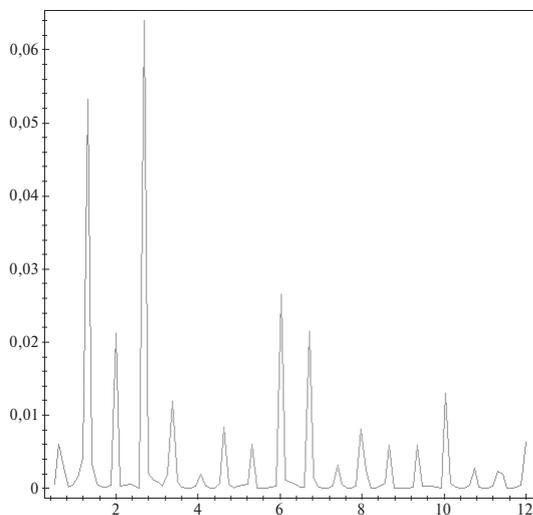
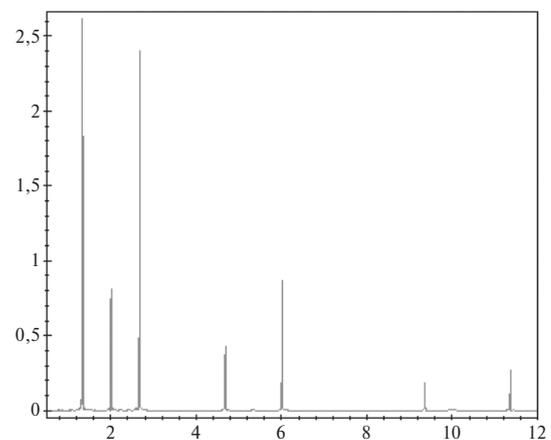


Рисунок 8. Десятисекундная запись ЭКГ, представленная по точкам отсчетов с частотой дискретизации 720 Гц (по оси абсцисс – время в секундах)



а)



б)

Рисунок 9. Спектры Фурье десятисекундной (а) и минутной (б) записей ЭКГ в диапазоне 0,5–12 Гц. Частотное разрешение составляет $\sim 0,1$ и $\sim 0,02$ Гц соответственно

аритмии, или экстрасистолии. Экстрасистола представляет собой внеочередное сердечное сокращение, зафиксированное на ЭКГ. У здорового человека количество экстрасистол может достигать 30–60 в час (0,5–1,0 в минуту). Если экстрасистолы возникают очень часто, на ЭКГ регистрируется чередование нормальных сердечных сокращений с экстрасистолическими, при этом каждое второе сокращение является экстрасистолическим.

Общий период сердечного цикла – 1,5 с, при этом пульс составляет 80 уд./мин, если подсчитываются все QRS компоненты, и 40 уд./мин, если учитываются только большие R- или S-волны.

На рис. 9 следует отметить существенное сужение отдельных линий спектра для минутной выборки ЭКГ, что в данном случае связано с отсутствием хаотизации частот.

Заключение

Сравнение спектральных особенностей спектрограмм ЭКГ и ФПГ позволяет говорить о некоторой схожести спектров Фурье. И в одном и в другом случаях можно судить о возникновении регулярной упорядоченной (и наоборот, не вполне регулярной или разупорядоченной) структуры спектров, проявляющейся на протяженных (не менее минуты) временных записях. В обоих случаях можно наблюдать затухание высокочастотных компонент спектра, однако для сигналов ЭКГ оно более медленное, что связано с большей спектральной шириной спектра отдельного сердцебиения. Что касается диагностической значимости представленных результатов, то говорить об этом в полной мере пока еще рано, поскольку необходимо проведение дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уваров А. А., Пеньков П. Г., Чебуренко Д. С. Спектральный анализ ЭКГ [Электронный ресурс]. URL: www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/036.pdf
2. Михайлов В. М. Вариабельность сердечного ритма: опыт практического применения. Иваново: Ивановская государственная медицинская академия, 2002. 290 с.
3. Захаров М. С. Динамика во времени вегетативных показателей на основе компьютерного спектрально-временного анализа ритмограмм сердца // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 5. С. 367–372.
4. Surda J., Lovas S., Pucik J., Jus M. Spectral Properties of ECG Signal. *Radioelektronika, 2007. 17th International Conference, Brno, Czech Republic, 24–25 April 2007*, pp. 1–5.
5. Murthy V. K., Grove T. M., Harvey G. A. et al. Clinical usefulness of ECG frequency spectrum analysis. *Proc. Ann. Symp. Comput. Appl. Med. Care*, 1978, 9 November, pp. 610–612.
6. Kulesa B., Srokovski T., Drozd S. Spectral Properties of ECG Series. The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland, Annual Report 2001.
7. Langner P. H., Jr., Geselowitz D. B. Characteristics of the frequency spectrum in the normal electrocardiogram and in subjects following myocardial infarction. *Circulation Research*, 1960, vol. 8, no. 3, pp. 577–584.
8. Применение вейвлет-преобразования и метода Прони для идентификации биогенных сигналов / А. В. Коломейцева, Г. В. Мишугова, А. П. Мул, Г. Ю. Рябых // Вестник ДГТУ. 2010. Т. 10. № 4 (47). С. 455–465.
9. Soorma N., Singh J., Tiwari M. Feature Extraction of ECG Signal Using HHT Algorithm. *Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2014, no. 8 (8), pp. 454–460.
10. Захаров С. М., Захаров М. С., Красовский В. Е. Спектрально-временные свойства кардиоинтервалов // Вопросы радиоэлектроники. 2014. Т. 4. № 3. С. 191–202.
11. Захаров М. С., Захаров С. М. Вейвлет-анализ фотоплетизмограмм сердечного ритма // Биомедицинская радиоэлектроника. 2014. № 12. С. 3–11.
12. PhysioBank ATM – PhysioNet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Захаров Сергей Михайлович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (916) 522-93-57, e-mail: sergei101@mail.ru.

Знайко Геннадий Григорьевич, к.т.н., зам. генерального директора, ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука», 119334, Москва, ул. Вавилова, д. 24, тел.: 8 (499) 135-53-56, e-mail: znayko_g@ineum.ru.

For citation: Zakharov S. M., Znayko G. G. Spectral analysis of electrocardiosignals. Voprosy radioelektroniki, 2017, no. 3, pp. 110–115.

S. M. Zakharov, G. G. Znayko

SPECTRAL ANALYSIS OF ELECTROCARDIOSIGNALS

A spectral analysis of electrocardiosignals is presented in paper with a view to possible extension of diagnostics of functional states. A comparative analysis on the qualitative level of spectral research methods of electrocardiographic (ECG) signals in comparison with the methods of photoplethysmography (PPG) is performed. The phenomenon of order and disorder in the ECG Fourier spectra is discussed.

Keywords: spectral analysis, electrocardiogram, photoplethysmogram, spectral resolution.

REFERENCES

1. Uvarov A. A., Penkov P. G., Cheburenko D. S. [Spectral analysis of ECG] (In Russ.). Available at: www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2011/C01/V02/036.pdf
2. Mikhaylov V. M. *Variabelnost serdechnogo ritma: opit prakticheskogo primeneniya* [Heart rate variability: the experience of the practical application]. Ivanovo, Ivanovo State Medical Academy, 2002. 290 p. (In Russian).
3. Zakharov M. S. Dynamics of Time vegetative indicators on the basis of computer spectral-temporal analysis of heart rhythmograms. *Informatsionnie tekhnologii*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 367–372 (In Russian).
4. Surda J., Lovas S., Pucik J. et al. Spectral Properties of ECG Signal. *Radioelektronika, 2007. 17th International Conference, Brno, Czech Republic, 24–25 April 2007*, pp. 1–5.
5. Murthy V. K., Grove T. M., Harvey G. A. et al. Clinical usefulness of ECG frequency spectrum analysis. *Proc. Ann. Symp. Comput. Appl. Med. Care*, 9 Nov. 1978, pp. 610–612.
6. Kulesa B., Srokovski T., Drozd S. Spectral Properties Series. *The Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Cracow, Poland, Annual Report 2001*.
7. Langner P. H., Jr., Geselowitz D. B. Characteristics of the frequency spectrum in the normal electrocardiogram and in subjects following myocardial infarction. *Circulation Research*, 1960, vol. 8, no. 3, pp. 577–584.
8. Kolomeytseva A. V., Mishugova G. V., Mul A. P., Ryabykh G. Yu. Application of wavelet transform and Prony method to identify nutrient conditions. *Vestnik DGTU*, 2010, vol. 10, no. 4 (47), pp. 455–465 (In Russian).
9. Soorma N., Singh J., Tiwari M. Feature Extraction of ECG Signal Using HHT Algorithm. *Int. Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2014, no. 8 (8), pp. 454–460.

10. Zakharov S. M., Zakharov M. S. Spectral and temporal properties of cardiointervals. *Voprosy radioelektroniki*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 191–202 (In Russian).
11. Zakharov M. S., Zakharov S. M. Wavelet analysis of heart rate photoplethysmogram. *Biomeditsinskaya radioelektronika*, 2014, no. 12, pp. 3–11 (In Russian).
12. [PhysioBank ATM – PhysioNet]. Available at: <http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM>

AUTHORS

Zakharov Sergey, Dr., professor, chief researcher, PJSC «Brook INEUM», 24, Vavilova st., Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: 8 (916) 522-93-57, e-mail: sergei101@mail.ru.

Znayko Gennadiy, PhD, deputy general director, of PJSC «Brook INEUM», 11933424, Vavilova st., Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: 8 (499) 135-53-56, e-mail: znayko_g@ineum.ru.