

**С. М. Захаров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»

# СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ КОРРЕЛЯЦИЙ СИГНАЛОВ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММ, АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПЛЕТИЗМОГРАММ

*Рассмотрен спектральный анализ одновременно снятых сигналов электрокардиограмм (ЭКГ), артериального давления (АД) и плетизмограмм (ПГ). Спектрограммы проанализированы для десятисекундных и минутных временных записей. Отмечается сходство данных, позволяющее говорить о временной корреляции исходных характеристик. Тот же вывод можно сделать относительно спектрального представления сигналов. Корреляция спектров выглядит лучше для сигналов АД и ПГ, чем для ЭКГ и АД, а также ЭКГ и ПГ. При этом важную роль играет явление упорядоченности (разупорядоченности) спектра в целом. Исходные данные взяты из международной базы данных Mimic 2,3 Waveform Database Part 1/31 системы PhisioBank ATM, а все вычисления выполнены с помощью программного пакета Maple 5v4.*

**Ключевые слова:** спектральный анализ, форма сигнала, диагностика сердечно-сосудистых заболеваний, вариабельность артериального давления

## Введение

Бурное развитие информационных технологий и компьютерной техники привело к их активному использованию в самых разных областях, в том числе и в медицине. Современные методы диагностики, в частности сердечно-сосудистых заболеваний, связаны с развитием традиционного электрокардиографического способа контроля сердечного ритма и представления информации. На сегодняшний день получили значительное развитие методы вариабельности сердечного ритма [1, 2], стационарного и нестационарного Фурье-анализа [3], вейвлет-анализа [4], автокорреляционного анализа сигналов ЭКГ [5] и др. Контроль сердечного ритма используется в клиниках при выявлении сердечно-сосудистых заболеваний и осложнений (ССО), оценке физиологического состояния пациентов и их потенциальных резервов (в частности, у спортсменов), а также при экстремальных стрессовых ситуациях и т.д.

Не менее важен контроль АД, в особенности в реанимационных палатах интенсивной терапии, где состояние больного может кардинально измениться в течение очень короткого промежутка времени. В этой связи представляется особенно важным создание современных устройств регистрации АД, работающих в режиме реального времени. Следует отметить, что вариабельности артериального давления (ВАД) в последнее время уделяется

повышенное внимание. Это обусловлено появлением результатов многочисленных исследований, подтверждающих значение показателей ВАД для прогнозирования сердечно-сосудистого риска.

ВАД – сложный многокомпонентный фактор, отражающий колебания АД в течение различных промежутков времени. В последние годы на первый план выходит феномен вариабельности клинического АД, или межвизитная ВАД [6]. Думается, что краткосрочная ВАД также важна для прогнозирования ССО. И хотя имеющиеся данные по ВАД достаточно противоречивы, необходимы дальнейшие рандомизированные исследования данного явления.

Настоящая работа посвящена качественному сравнительному анализу данных, полученных при одновременной регистрации сигналов ЭКГ, АД и ПГ. В результате проведенного анализа отмечается сходство данных, которое позволит говорить о временной корреляции исходных характеристик. То же самое можно сказать и в отношении спектрального представления всех сигналов, при этом важную роль играет явление упорядоченности (разупорядоченности) спектра в целом [7]. Отметим, что исходные данные были взяты из международной базы данных Mimic 2,3 Waveform Database Part 1/31 системы PhisioBank ATM [8], а для вычислений использовался программный пакет Maple 5v4.

### Сравнительный анализ одновременной записи сигналов ЭКГ, АД и ПГ во временной и спектральной областях

Вначале в качестве примера рассмотрим файл Mimic2wdb/3100033–0003, содержащий записи сигналов ЭКГ и АД. Отметим, что проблемы мониторинга сердечного ритма в случаях ЭКГ, АД и ПГ являются очень похожими. Тем не менее рассматриваемые сигналы отражают различные свойства функционирования сердечно-сосудистой системы: ЭКГ и ПГ – электрической активности, а АД – механической, поэтому временные формы их фрагментов существенно различаются.

На рис. 1 представлены ЭКГ (во втором отведении) и АД, зарегистрированные на десятисекундном временном интервале.

На рис. 1а отображены узкие R- и S-пики с резкими выбросами вверх и вниз. В отличие от ЭКГ, отражающей электрическую активность сердечной мышцы, форма волны сигнала АД определяется как выбросом крови из левого желудочка в аорту во время систолы, так и последующим стоком крови через периферические артерии во время диастолы. Систолическая компонента АД состоит из крутого подъема давления

и отстоит по времени от ЭКГ примерно на 0,5 с, отражая при этом механическую активность левого желудочка. Поскольку ЭКГ насыщена более мелкими деталями по сравнению с АД, то это отличие должно проявиться и в частотной области.

На рис. 2 представлены спектрограммы ЭКГ (а, б) и АД (в, г) в области частот от 0 до 10 Гц. Спектрограммы (рис. 2б, г) относятся к минутной записи по времени, поэтому различие в спектрах (рис. 2а, в) и (рис. 2б, г) состоит в основном в спектральном разрешении, равном 0,1 и 0,016 Гц соответственно. Спектры ЭКГ трудно назвать полностью упорядоченными, поскольку имеется сложная спектральная область в интервале от 0 до 2 Гц. Спектры же АД, в отличие от ЭКГ, имеют регулярную, вполне упорядоченную структуру. В целом спектральная область ЭКГ гораздо шире по сравнению с таковой у АД, что связано с резкими фронтами R- и S-пиков.

Далее рассмотрим файл Mimic2wdb/3100119–0010, содержащий записи сигналов ЭКГ, АД и ПГ. На рис. 3 представлены результаты десятисекундной записи во времени.

Кривая АД (рис. 3б) так же, как и на рис. 1б, отстоит по времени от ЭКГ на 0,4 с. Кроме того,

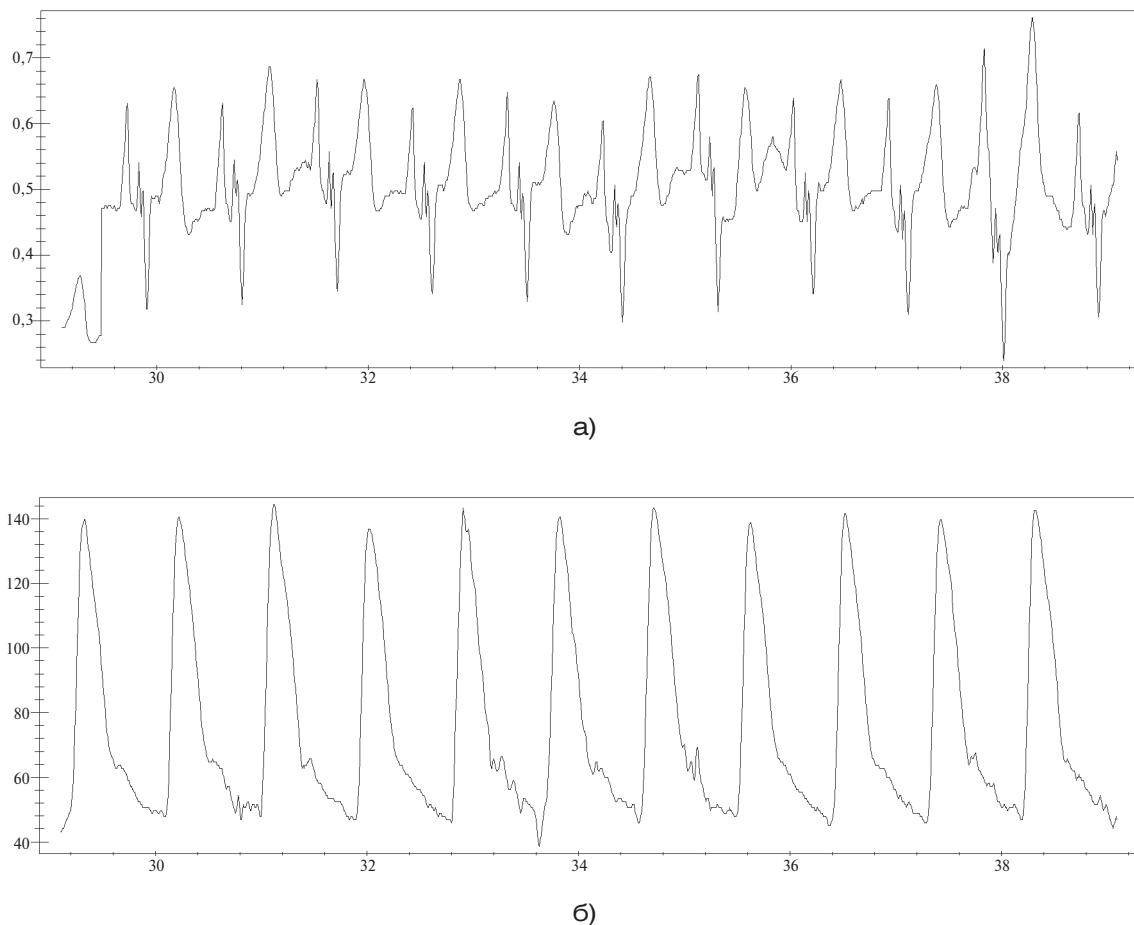


Рисунок 1. Сигналы электрокардиограмм (а) и артериального давления (б), записанные на десятисекундном временном интервале (частота дискретизации – 125 Гц; число отсчетов – 1250; период следования импульсов – около 0,9 с)

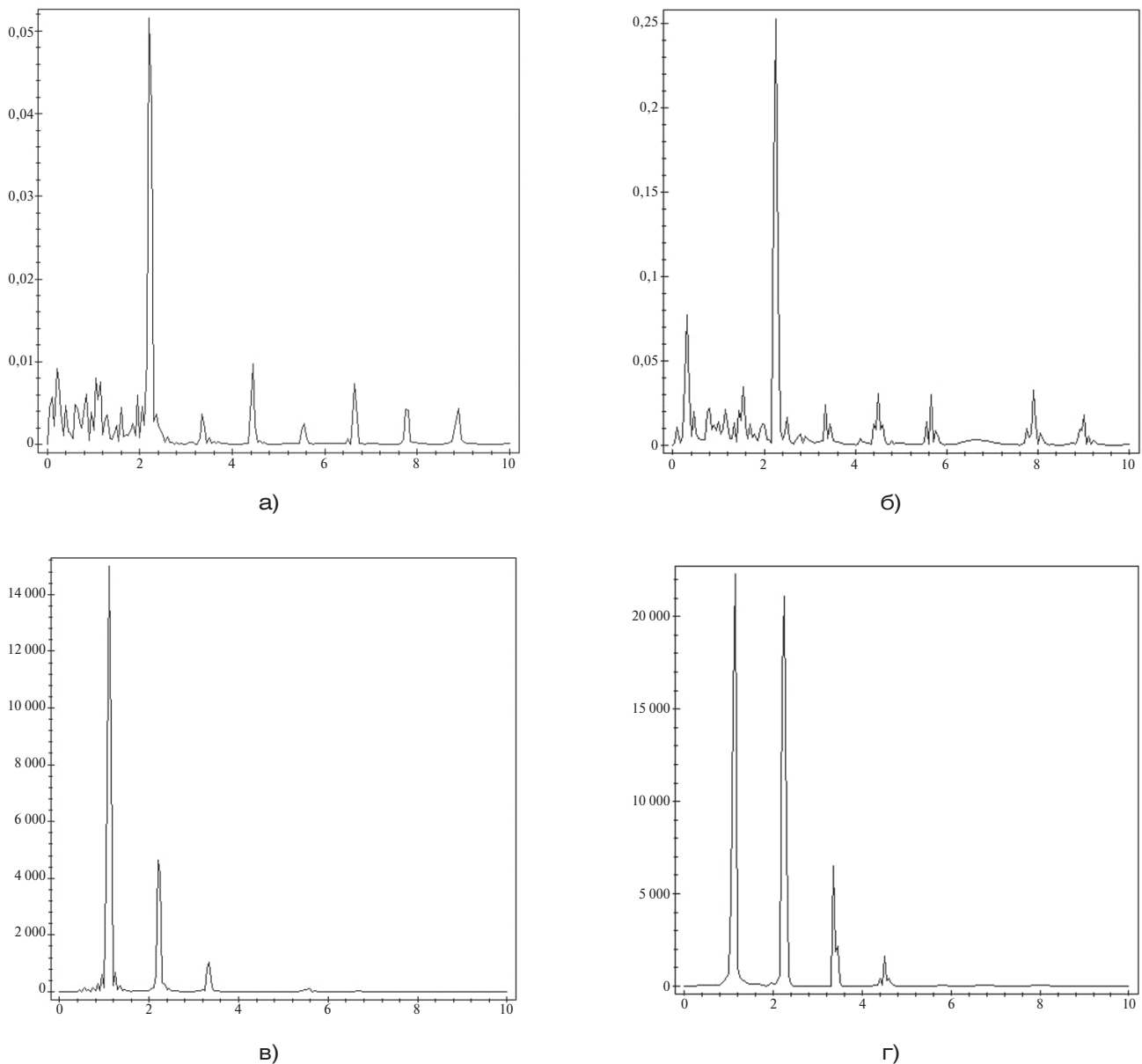


Рисунок 2. Спектрограммы сигналов электрокардиограмм (а, б) и артериального давления (в, г) в частотной области от 0 до 10 Гц (б, г – данные для минутной записи по времени с частотой дискретизации 125 Гц)

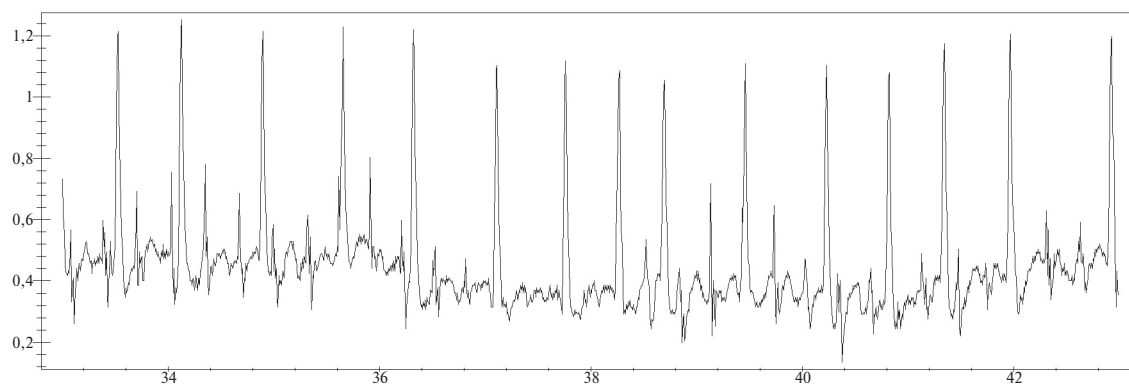
имеется значительный разброс в RR-интервалах, что, по-видимому, связано с сильной аритмией. На рис. 4 представлены спектрограммы временных записей. В силу значительного разброса длительностей между RR-пиками каждый из спектров на рис. 4 размыт (разупорядочен), причем область размытия для сигналов АД (рис. 4в, г) и ПГ (рис. 4д, е) заметна уже по сравнению с ЭКГ (рис. 4а, б). Поэтому корреляция спектров выглядит лучше для сигналов АД и ПГ, чем для ЭКГ и АД, а также ЭКГ и ПГ. Структура же всех спектров на рис. 4 – разупорядоченная.

В заключение рассмотрим файл Mimic2wdb/3100119–0003 из той же базы данных. Временные десятисекундные записи сигналов ЭКГ, АД и ПГ представлены на рис. 5. Здесь длительности

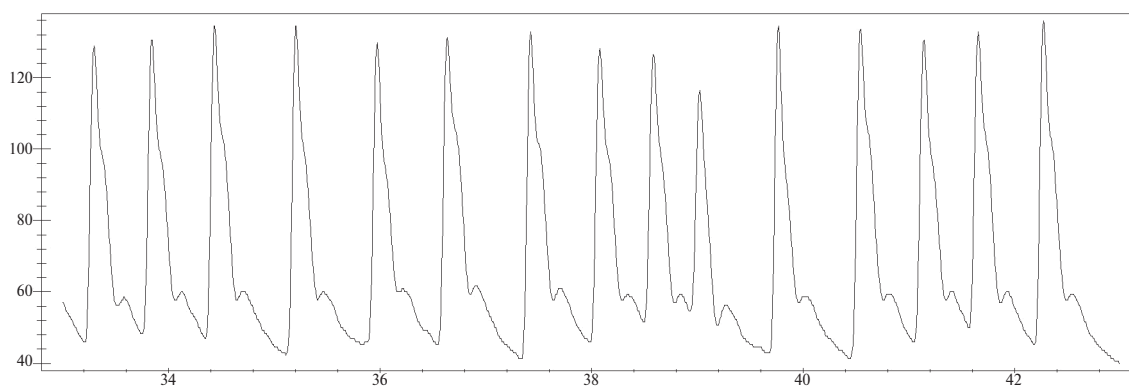
RR-интервалов также представляют собой довольно нерегулярную структуру, а сигнал артериального давления (рис. 5б) слишком велик, из-за чего обрезан сверху. Поэтому в спектральной области следует ожидать возникновение разупорядоченной структуры, что и подтверждает рис. 6.

### Выводы

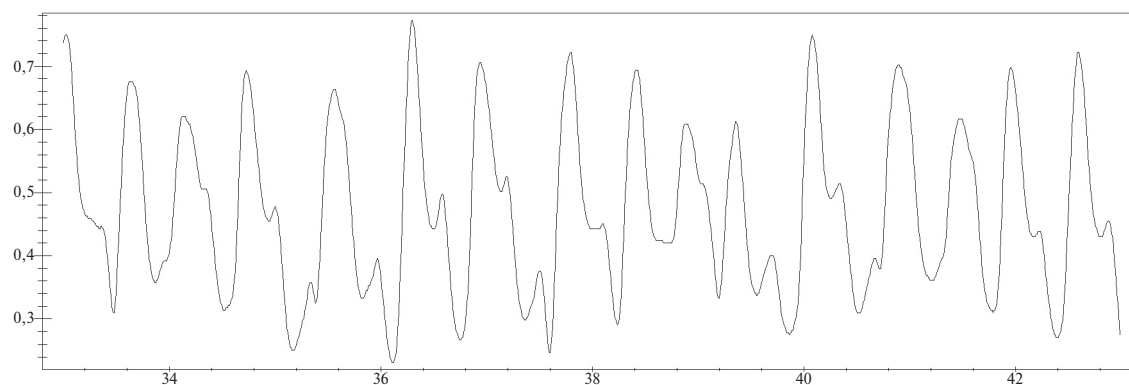
В работе на качественном уровне рассмотрены корреляции сигналов ЭКГ, АД и ПГ. Отметим, что корреляция указанных сигналов может наблюдаться как во временной, так и в спектральной областях. Корреляция спектров выглядит лучше для сигналов АД и ПГ, чем для ЭКГ и АД, а также ЭКГ и ПГ. При этом она проявляется на фоне либо упорядоченной, либо разупорядоченной структур.



а)

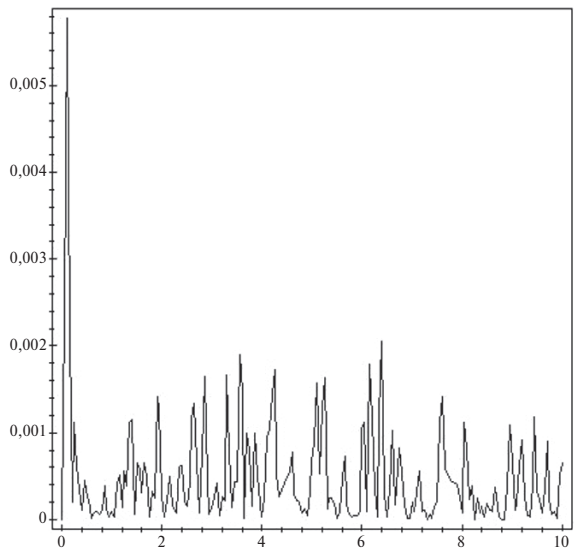


б)

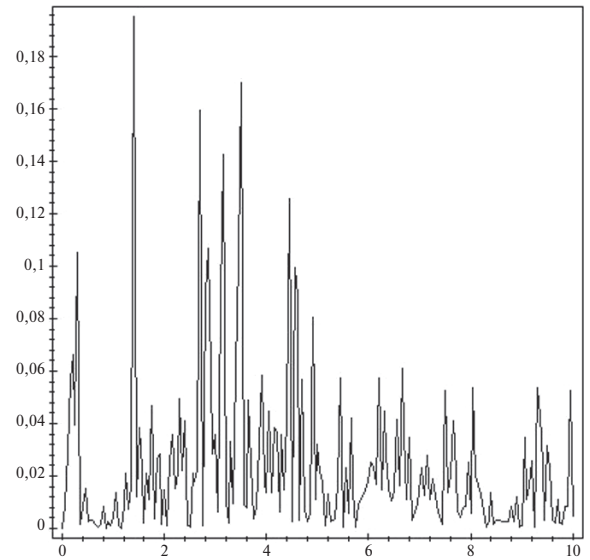


в)

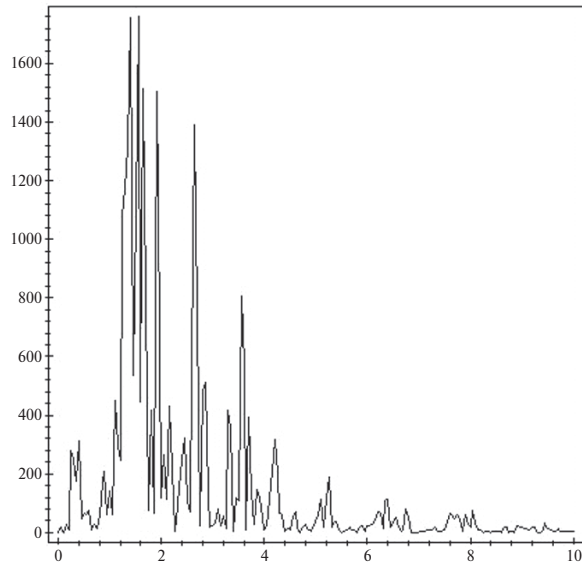
Рисунок 3. Десятисекундная временная запись сигналов электрокардиограмм (а), артериального давления (б) и плетизмограмм (в) (данные файла Mimic2wdb/3100119-0010; частота дискретизации – 125 Гц; период сердечных сокращений – около 0,6 с)



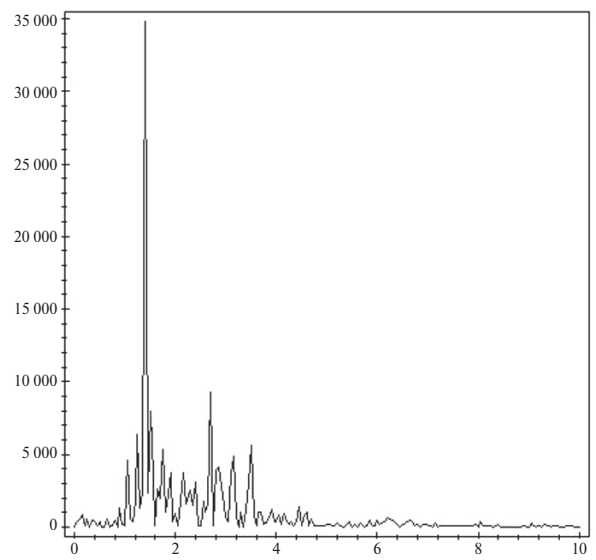
а)



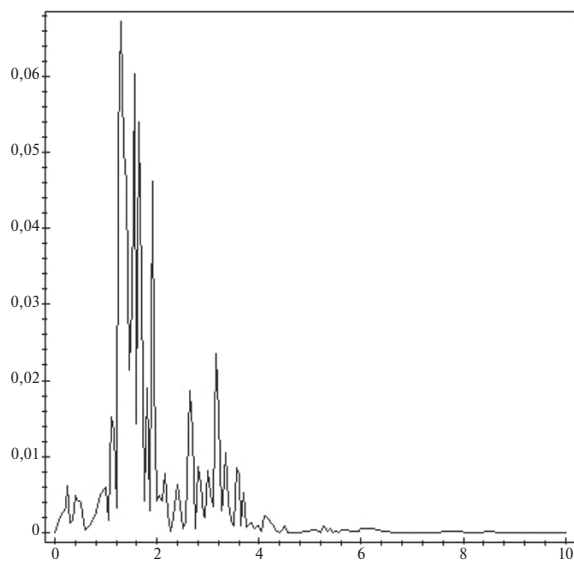
б)



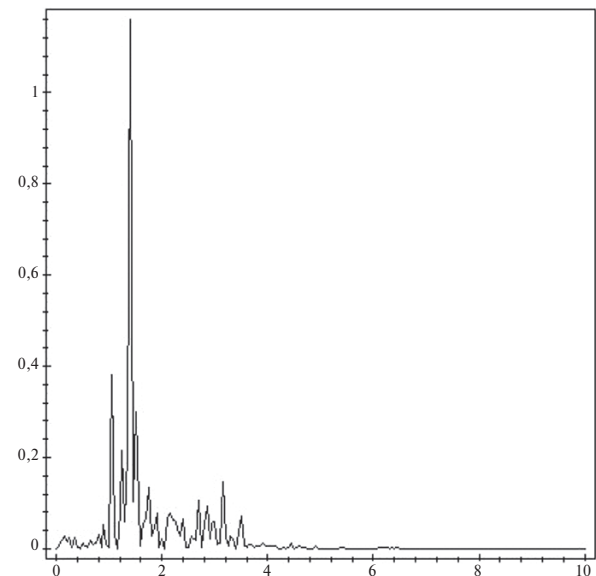
в)



г)

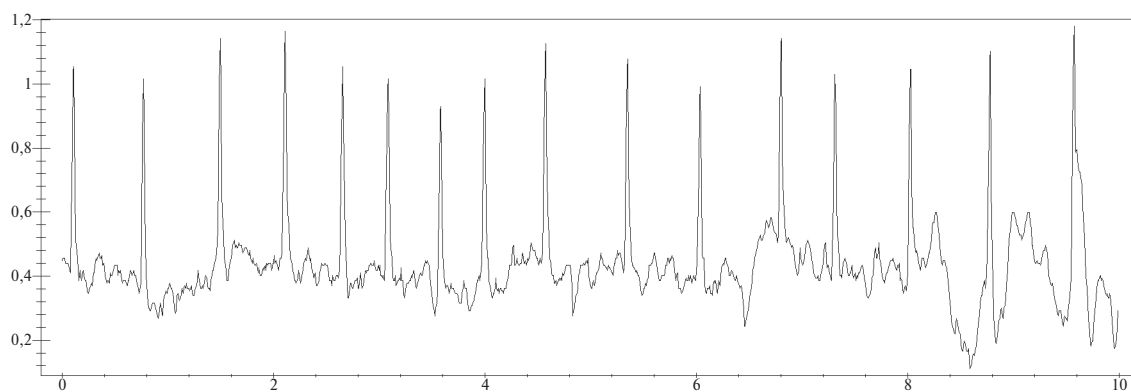


д)

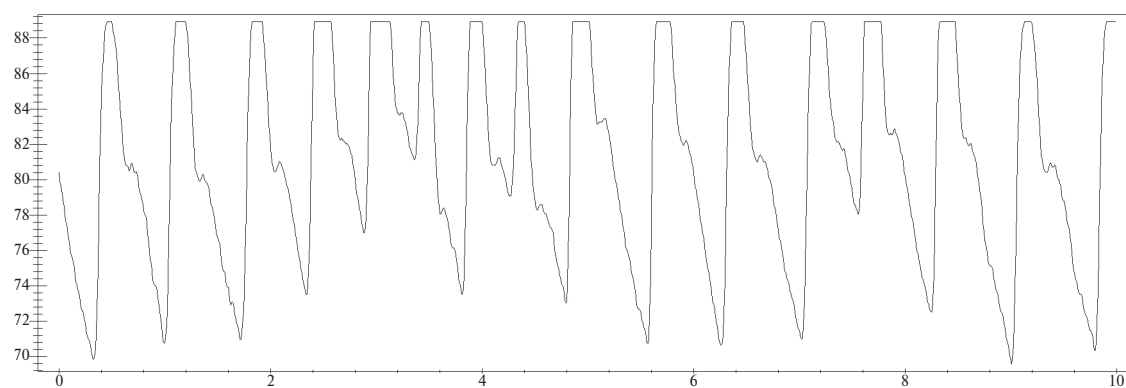


е)

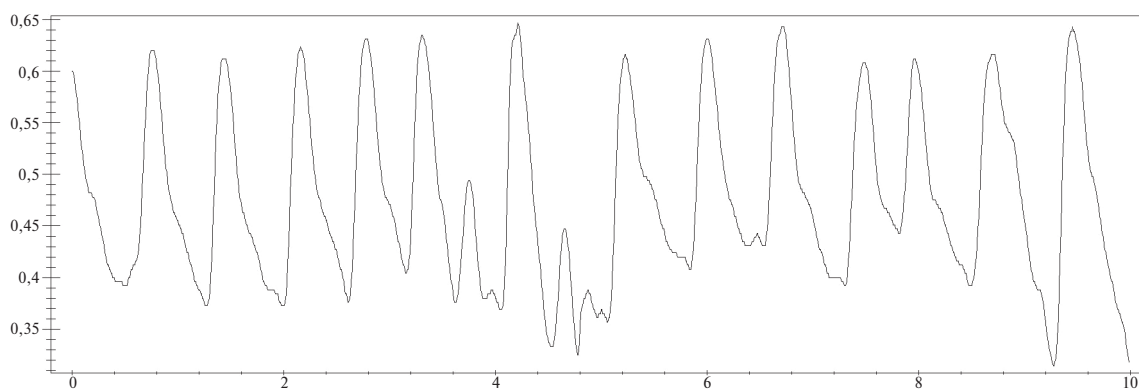
Рисунок 4. Спектрограммы сигналов электрокардиограмм (а, б), артериального давления (в, г) и плетизмограмм (д, е), соответствующие десятисекундной (а, в, д) и минутной (б, г, е) записям



а)

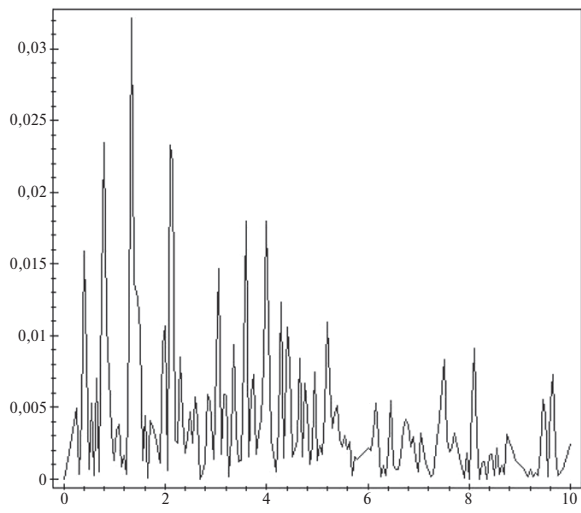


б)

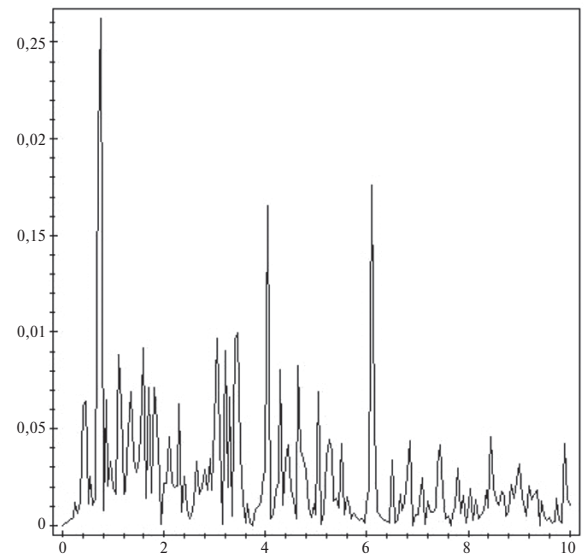


в)

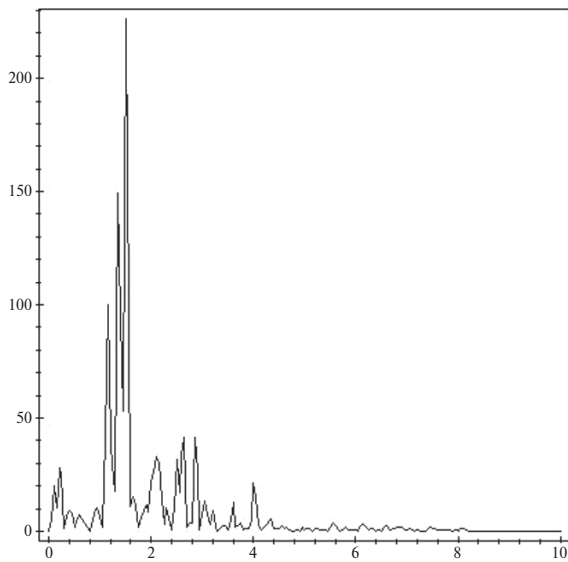
Рисунок 5. Десятисекундная запись сигналов электрокардиограмм (а), артериального давления (б) и плетизмограмм (в) (данные файла Mimic2wdb/3100119-0003; период сердечных сокращений – около 0,6 с)



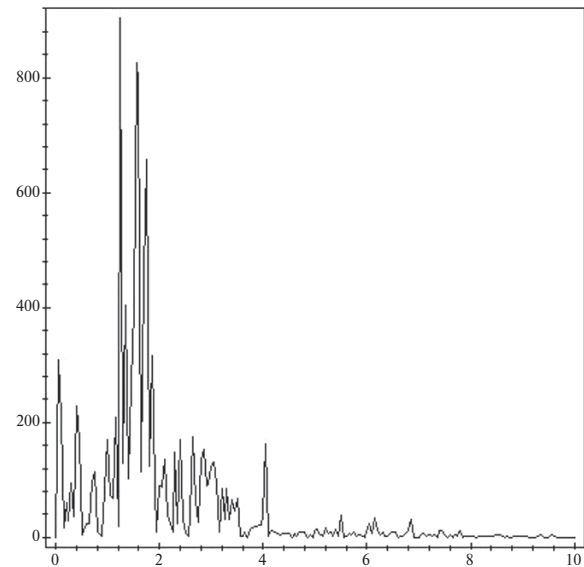
а)



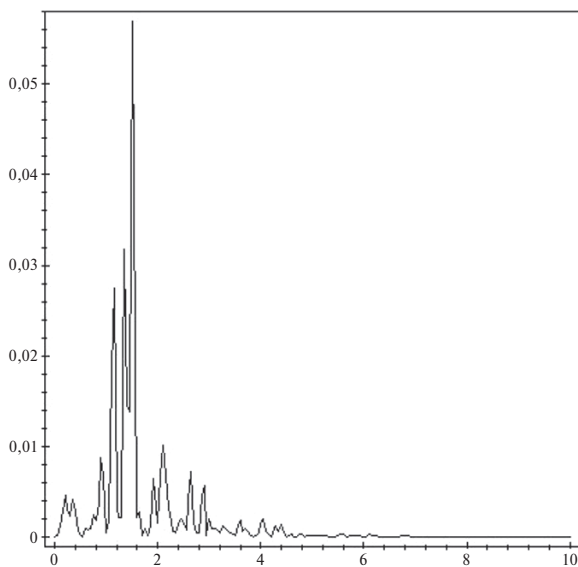
б)



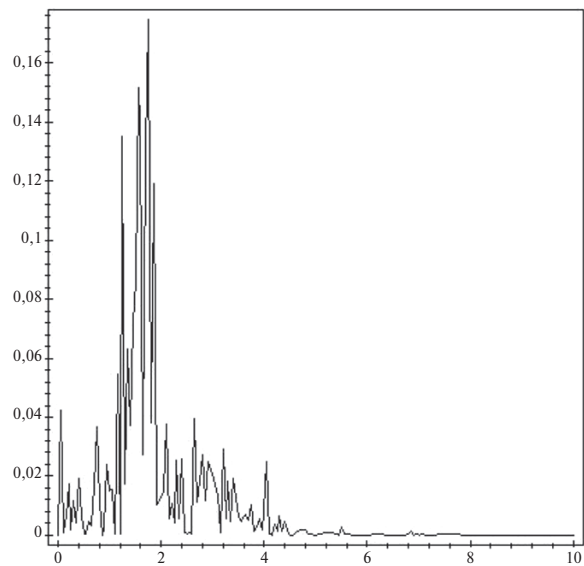
в)



г)



д)



е)

Рисунок 6. Спектры сигналов электрокардиограмм (а, б), артериального давления (в, г) и плетизмограмм (д, е) (данные файла Mimic2wdb/3100119-0003; б, г, е – данные для минутной записи)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 66–87.
2. Бокерия Л. А., Бокерия О. Л., Волковская И. В. Variability сердечного ритма: методы измерения, интерпретация, клиническое использование // Анналы аритмологии. 2009. № 4. С. 21–32.
3. Бережной В. Н., Захаров М. С., Захаров С. М. Динамика во времени спектральных особенностей сигналов пульсовой волны, полученных методом фотоплетизмографии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2013. № 6. С. 36–43.
4. Рунова Е. В. Вейвлет-анализ variability сердечного ритма в оценке функционального состояния регуляторных систем организма человека: дисс. канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2008. 160 с.
5. Анциперов В. Е., Мансуров Г. К. Использование концепции аналитического спектра в задачах мониторинга ритма артериального давления // Сб. тр. VIII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и связь». М., 2014. С. 363–367.
6. Горбунов В. М. Современные представления о variability артериального давления // Рациональная фармако-терапия в кардиологии. 2012. № 8(6). С. 810–818.
7. Захаров С. М., Захаров М. С. Спектральный анализ аритмий сердца // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 2. С. 120–127.
8. PhysioBank ATM – PhysioNet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM> (дата обращения: 30.09.2018)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

*For citation: Zakharov S. M. Spectral estimates of correlations of electrocardiogram signals, arterial pressure and plethysmograms. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 1, pp. 64–71. DOI 10.21778/2218-5453-2019-1-64-71*

S. M. Zakharov

### SPECTRAL ESTIMATES OF CORRELATIONS OF ELECTROCARDIOGRAM SIGNALS, ARTERIAL PRESSURE AND PLETHYSMOGRAMS

Spectral analysis of simultaneously recorded signals of electrocardiograms, arterial pressure and plethysmograms is considered. Spectrograms are analyzed for ten-second and minute time records. There is a similarity of data, which allows us to talk about the temporal correlation of the initial characteristics. The same applies to the spectral representation of all signals. Correlation of spectra looks better for signals of blood pressure (BP) and PG than for ECG and BP (ECG and PG), while the phenomenon of ordering (disordering) of the spectrum as a whole plays an important role. The initial data was taken from the international database Mimic 2.3 Waveform Database Part 1/31 of the PhysioBank ATM system, and all calculations were performed using the Maple package.

**Keywords:** spectral analysis, waveform, diagnosis of cardiovascular diseases, blood pressure variability

## REFERENCES

1. Baevskiy R. M., Ivanov G. G., Chireikin L. V. et al. Heart rate variability analysis when using various electrocardiographic systems (methodical recommendations). *Vestnik aritmologii*, 2001, no. 24, pp. 66–87. (In Russian).
2. Bokeriya L. A., Bokeriya O. L., Volkovskaya I. V. Heart rate variability: measurement methods, interpretation, clinical use. *Annali aritmologii*, 2009, no. 4, pp. 21–32. (In Russian).
3. Berezhnoi V. N., Zakharov M. S., Zakharov S. M. Dynamics in time spectral characteristics of pulse wave signals received by the method fotopletizmografii. *Biomeditsinskaya radioelektronika*, 2013, no. 6, pp. 36–43. (In Russian).
4. Runova E. V. Wavelet analysis of heart rate variability in evaluation of the functional status of the regulatory systems of the human body: *Veyvlet-analiz variabelnosti serdechnogo ritma v otsenke funktsionalnogo sostoyaniy regulatornykh sistem organizma cheloveka* [dissertation]. Nizhniy Novgorod, 2008, 160 p. (In Russian).
5. Antsiperov V. E., Mansurov G. K. The use of the concept of the analytical spectrum in rhythm of arterial pressure monitoring tasks. (Conference proceedigs) VIII Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiokatsiya i svyaz». Moscow, 2014, pp. 363–367. (In Russian).
6. Gorbunov V. M. Modern views on blood pressure variability. *Ratsionalnaya farmakoterapiya v kardiologii*, 2012, no. 8 (6), pp. 810–818. (In Russian).
7. Zakharov S. M., Zakharov M. S. Spectral analysis of heart arrhythmias. *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 2, pp. 120–127. (In Russian).
8. PhysioBank ATM – PhysioNet. Available at: <http://www.physionet.org/cgi-bin/atm/ATM> (accessed 30.09.2018).

## AUTHOR

**Zakharov Sergey**, D. Sc., professor, chief researcher, PJSC Brook INEUM, 24, Vavilova St., Moscow, 119334, Russian Federation, tel.: +7 (916) 522-93-57, e-mail: sergei101@mail.ru.