

**Н. Ю. Савельева, А. Ю. Жержова, О. И. Сергейчик,
О. П. Васильева**

Спектральный анализ суточного мониторирования артериального давления

В статье показаны особенности спектрального анализа временных кардиологических рядов артериального давления. Сравнительный анализ систолического и диастолического артериального давления больного артериальной гипертонией и здорового человека выявил наличие некоторых цикличностей, влияющих на величину и скорость изменения давления.

Артериальная гипертония (АГ) считается самым распространенным неинфекционным заболеванием. Снижение уровня смертности от сосудистых осложнений АГ напрямую зависит от качества проводимой диагностики и адекватности выбора лечебной тактики. Однако правильно поставить этот вроде бы несложный диагноз всегда очень непросто, так как, во-первых, необходимо исключить наличие вторичной артериальной гипертонии, во-вторых, объективно оценить тяжесть заболевания, которая и определяет тактику лечения и целый ряд экспертных заключений.

До недавнего времени объективизировать степень тяжести АГ было возможным только с помощью рутинного определения «офисного» артериального давления (АД) путем его измерения во время врачебного приема на локтевой артерии по тонам Короткова.

В последние годы арсенал объективных методов кардиологии пополнился новым методом — суточным мониторированием артериального давления (СМАД). Однако до настоящего времени не до конца разработана четкая интерпретация данных СМАД. Не вызывает сомнения, что возможности данной методики могут быть многократно расширены за счет применения математических методов расчета показателей.

В данной работе сделана попытка поиска дополнительных показателей СМАД у больных АГ с помощью спектрального анализа.

Суточное мониторирование артериального давления является распространенным средством решения многих клинических и научно-исследовательских задач, стоящих перед кардиологами [1]. Это исследование вариабельности суточного ритма, утренний подъем АД, индексов времени и др. [1, 3–5].

Артериальному давлению, как и всем физиологическим параметрам организма, свойственны колебания (вариабельность), которые, очевидно, могут быть выявлены только при 24-часовом мониторировании.

В формировании вариабельности АД принимают участие многие системы организма, однако ведущая роль принадлежит центральным нервным механизмам — суточной периодичности возбуждения и торможения в коре головного мозга [8]. Этим можно объяснить наличие гармоник с периодом в 24 часа.

На системном уровне в формировании колебаний АД играет роль вариабельность общего периферического сосудистого сопротивления, сердечного выброса и частоты сердечных сокращений, на региональном — изменение потребности в кровоснабжении головного мозга и других органов [8].

Большое влияние на формирование колебаний АД оказывают периоды активности вегетативной нервной системы: симпатической (симптоадреналовой) и парасимпатической [9, 10]. Вероятно, это обуславливает наличие гармоник АД с периодом в 24 и 4 часа.

Различают два вида колебаний АД: «ритмические», связанные с автономным функционированием сердечно-сосудистой системы и дыхательным циклом, и «нерегулярные», связанные с реакцией организма на различные воздействия окружающей среды [10].

1. «Ритмические» колебания:

- высокочастотные (частота более 0,3 Гц);
- среднечастотные (0,2–0,3 Гц), связанные, очевидно, с дыхательным циклом;
- низкочастотные (0,05–0,15 Гц);
- очень низкой частоты (менее 0,025 Гц).

2. «Нерегулярные» колебания:

- кратковременные;
- циркадные (перепад день-ночь, утренний подъем АД);
- изменения АД в разные дни;
- сезонные.

Ритмические колебания АД составляют 20–25 % от общей суточной вариабельности АД. Установлено, что амплитуда среднечастотных колебаний значительно снижается в ночное время.

По мере прогрессирования гипертонической болезни отмечается снижение суточной (24-часовой) вариабельности АД, появление вечернего и ночного типов кривых. С возрастом вариабельность АД увеличивается за счет кратковременного компонента колебаний [8].

Спектральный анализ суточного ритма АД, назовем его суточным временным кардиологическим рядом АД (СВКРАД), позволяет определить наличие в этих рядах некоторых цикличностей, обусловленных режимом работы, отдыха, питания пациента. Известно, что наличие их, и особенно изменение амплитуды, ведет к увеличению «площади гипертонии» и является настораживающим симптомом для пациента и лечащего врача. Увеличение площади гипертонии возможно из-за совпадения по фазе цикличностей, вызванных разными причинами. Спектральный анализ позволяет выявить и исследовать такие случаи. Результатом таких исследований могут быть рекомендации для больного по изменению режима труда, отдыха, питания.

В статье приведены результаты спектрального анализа систолического и диастолического АД больного и здорового человека. Рассмотрим некоторые соображения, связанные с предварительной обработкой данных мониторингирования АД.

Эти соображения будут относиться к временным рядам систолического (САД) и диастолического (ДАД) артериального давления, полученным в результате мониторингирования с интервалом опроса 15 мин в дневное и 30 мин в ночное время.

Суточный кардиологический временной ряд АД имеет свои особенности, которые отражаются на методике спектрального анализа и просто анализа временного ряда. В классической методике анализа временных рядов [6] все начинается с редактирования данных, т. е. исключения случайных выбросов и замены пропусков средним значением от двух рядом лежащих. Здесь это не всегда возможно. Иногда пропуск приходится заполнять синхфазным значением из рядом расположенного цикла. Решение должен принимать специалист-кардиолог. Далее, обычно анализ предполагает определение тренда с заданной степенью полинома и исключение его из исходного ряда. Здесь это также рекомендуется, так как ряд представляет собой суточное мониторингирование (24 часа) с наложенными на него различными цикличностями, случайными как по амплитуде, так и по фазе, причем положительная и отрицательная полуволны не симметричны. Наличие линейного тренда вносит искажения в спектральный анализ на низких частотах. Кроме того, до спектрального анализа необходимо централизовать случайный процесс, т. е. вычесть среднее значение. Ниже приведены исходный ряд суточного мониторингирования (рис. 1) и временной ряд, полученный после редактирования в соответствии с рекомендациями, изложенными выше (рис. 2).

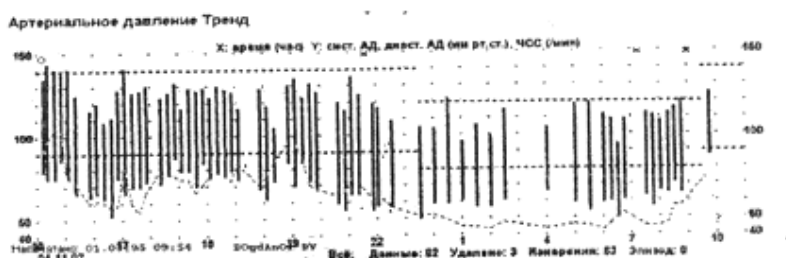
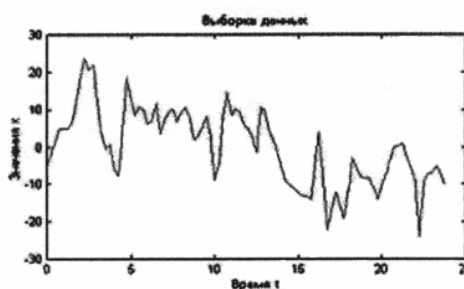


Рис. 1. Исходный временной ряд артериального давления здорового человека



Статистическая информация

Количество точек	96
Минимальное значение	-24.202652
Максимальное значение	23.757348
Диапазон	47.960000
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	10.117602
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	10.064769
Медиана	0.657348
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	101.299567
Момент порядка 3	5.577089
Момент порядка 4	25725.651285
Момент порядка 5	15880.549931
Средний квадрат	101.299567
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	51.342931

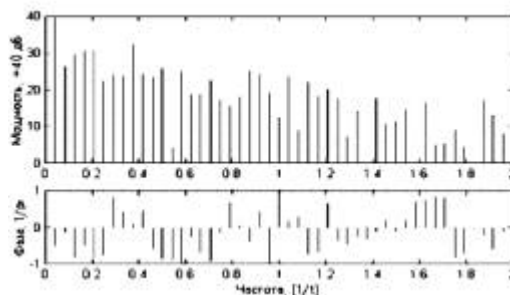
Рис. 2. Временной ряд и статистика систолического давления здорового человека после редактирования данных

Поскольку интервал отсчета измерения при мониторинговании АД составляет 15 мин, то максимальная частота в спектре предполагается $\frac{1}{2} \cdot 15 \cdot 60 = 0,55 \cdot 10^{-3}$ Гц. Другими словами, колебания с периодом 30 мин. Все остальные частоты, если они имеют место быть, будут маскироваться в верхней части спектра [6]. Следовательно, при обработке кардиологических временных рядов при мониторинговании АД достоверным будет анализ только на частотах с периодом меньше 30 мин.

Выясним, существуют ли колебания при мониторинговании АД с большими частотами или меньшими периодами. Из литературных источников известно, что в результате дыхательной аритмии возможны пульсирующие изменения АД, причем интервал колебаний составляет 10–80 секунд [3]. Кроме того, отмечается наличие «медленных колебаний частоты сердцебиений» [3] или медленные волны артериального давления 3-го порядка с периодом около 10 секунд.

В практике обработки временных рядов существует два метода исключения влияния частот больших $\frac{1}{2}$ интервала опроса: 1) необходимо уменьшить интервал опроса при мониторинговании до величины $\frac{1}{2} f_{\max}$, где f_{\max} — максимальная известная частота колебаний АД; 2) нужно провести фильтрацию исходного ряда с пороговой частотой (при мониторинговании это $0,55 \cdot 10^{-3}$ Гц). Первая процедура невозможна исходя из принципа измерения АД, можно лишь уменьшить интервал опроса до 5 минут. Таким образом, остается предварительная фильтрация исходного ряда. Ее можно выполнять при помощи стандартной процедуры усреднения методом скользящего среднего (СС), используя пакет программ «STATISTICA 6.0».

Спектр Фурье (периодограмма)



Обобщенный метод Прони $p = 38$, $NF = 96$

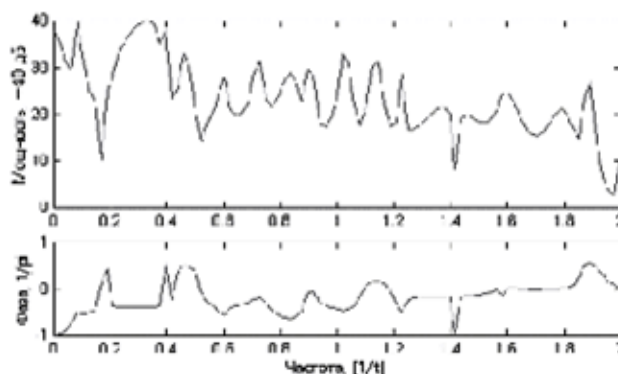


Рис. 3. Спектральные характеристики временного ряда систолического давления здорового человека

Рассмотрим спектральные характеристики АД здорового человека (рис. 3, 4) и больного артериальной гипертонией (рис. 5, 6), полученные с помощью методов быстрого преобразования Фурье (БПФ), Прони и СПМ (спектральная плотность мощности) (подробнее о методах см.: [7]). Они показывают достаточно хорошую сходимость ряда. Это позволяет говорить о приемлемости спектрального анализа временных рядов САД и ДАД, полученных мониторингованием этими методами. Кроме того, достаточно достоверно просматривается гармоника с периодом 24 часа, 4 часа, 1,5 часа,

40–45 мин, 30 мин, что также коррелируется с определенными представлениями кардиологов о причинах изменения АД в течение суток.

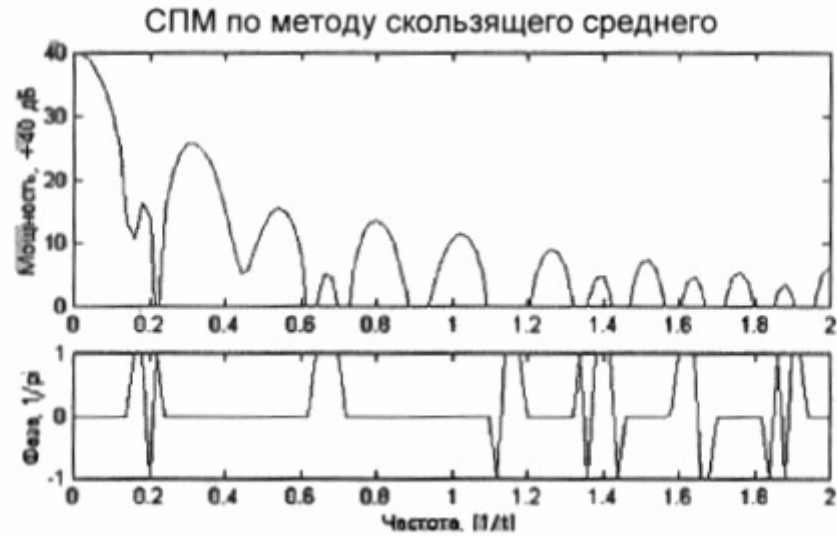
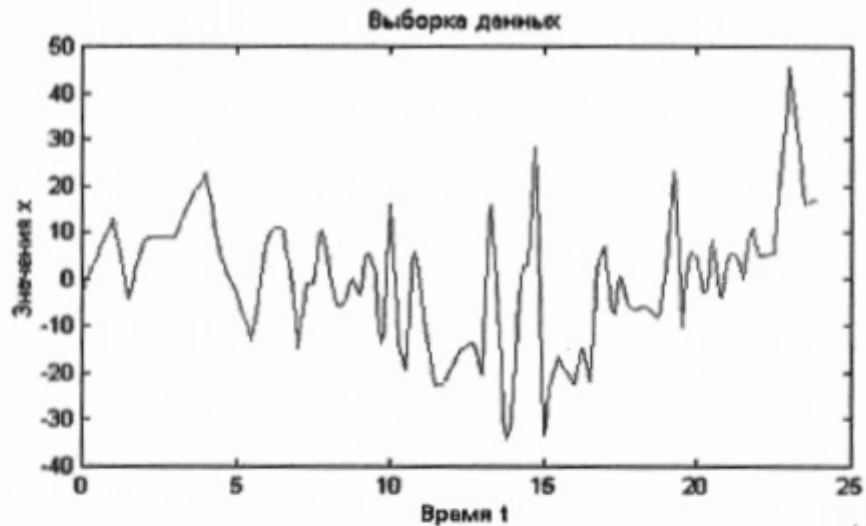


Рис. 4. Спектральная характеристика временного ряда систолического давления здорового человека, полученная методом спектральной плотности мощности



Статистическая информация

Количество точек	96
Минимальное значение	-35.128295
Максимальное значение	45.475588
Диапазон	80.603883
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	14.608875
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	14.532588
Медиана	1.109871
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	211.196107
Момент порядка 3	460.533376
Момент порядка 4	152198.839588
Момент порядка 5	1653842.956014
Средний квадрат	211.196107
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	106.291201

Рис. 5. Исходный ряд и статистика систолического давления больного человека после предварительной обработки

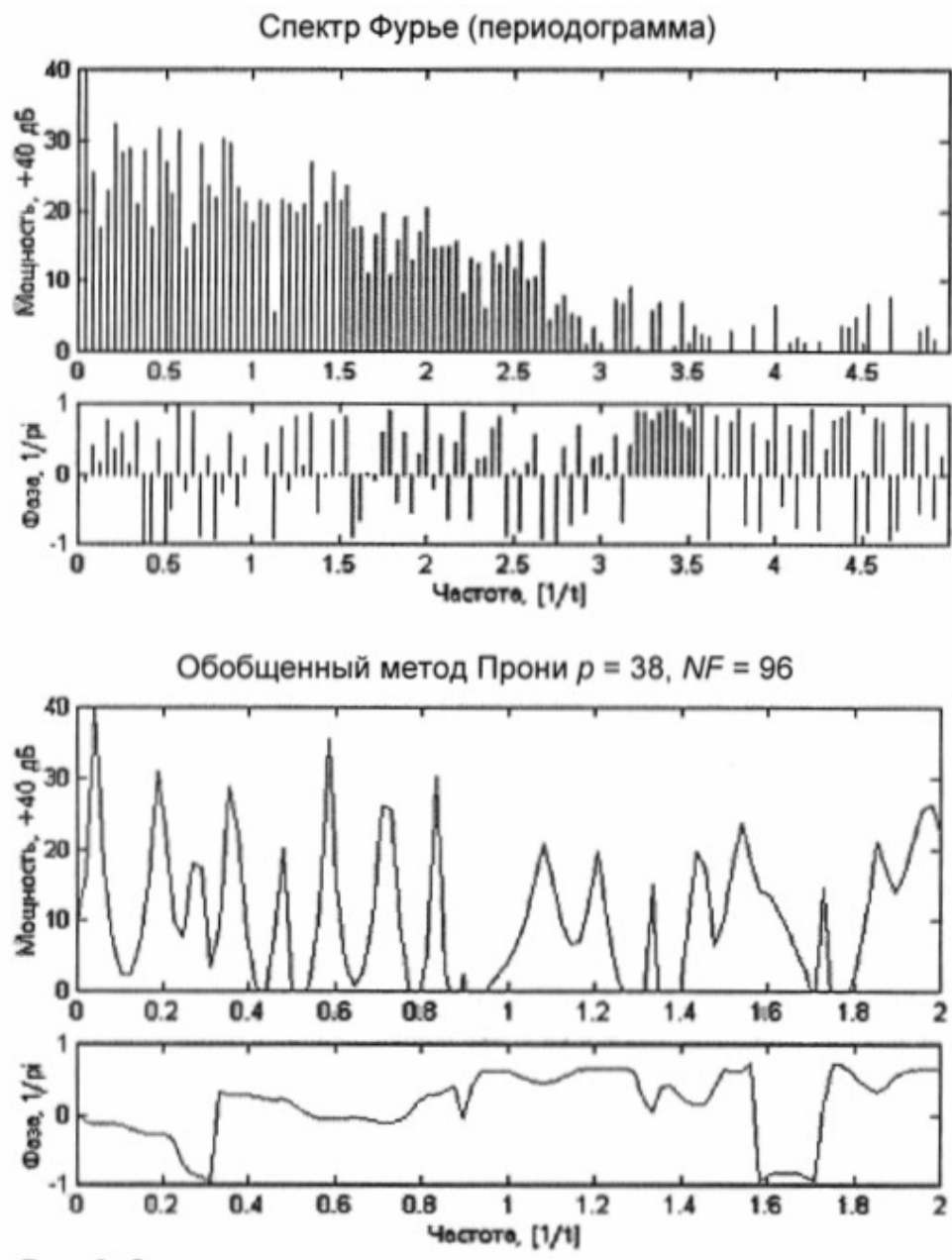
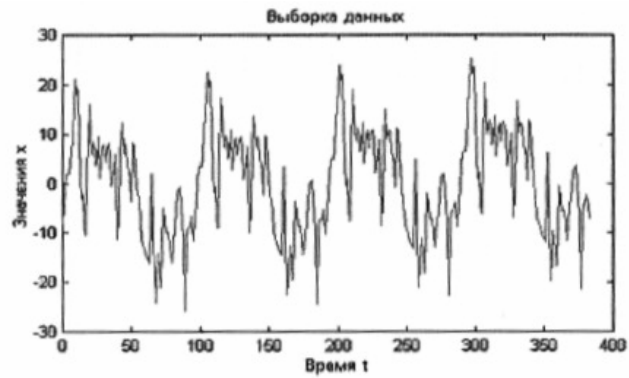


Рис. 6. Спектральные характеристики систолического давления больного человека, полученные методом БПФ и Прони

Для уточнения амплитуды суточного колебания проведем спектральный анализ этих же временных рядов, повторенных 4 раза, т. е. с количеством отсчетов 96.

Полученные частотные и фазовые характеристики приведены на рис. 7–9. Сравнительный анализ с такими же характеристиками на рис. 3, 4 говорит о совпадении результатов, особенно выявленных выше цикличностей.

Это означает, что достаточно вести спектральный анализ по суточному ряду без повторения.



Статистическая информация

Количество точек	384
Минимальное значение	-25.741964
Максимальное значение	25.341714
Диапазон	51.083677
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	9.939090
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	9.926140
Медиана	0.673408
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	98.528265
Момент порядка 3	1.210523
Момент порядка 4	24876.367032
Момент порядка 5	9666.520059
Средний квадрат	98.528265
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	49.264133

Рис. 7. Исходный ряд и статистика систолического давления здорового человека, повторенный 4 раза

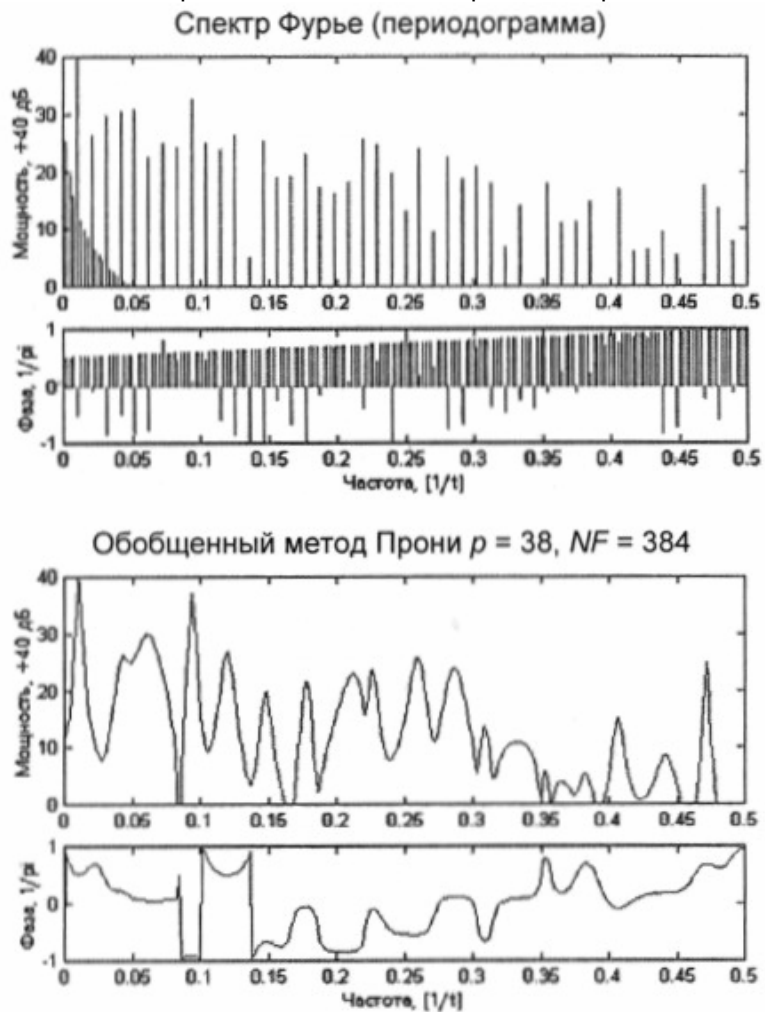


Рис. 8. Спектральные характеристики суточного временного ряда САД, повторенного 4 раза у здорового человека

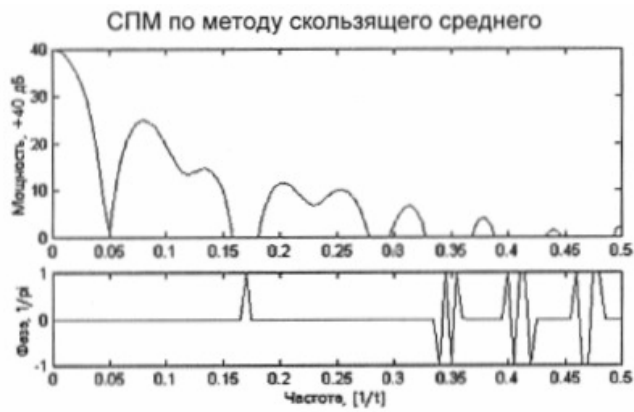


Рис. 9. Спектральная характеристика суточного временного ряда САД, повторенного 4 раза у здорового человека

Весьма интересным является вопрос, повторяется ли спектр временных рядов систолического и диастолического давления, полученных при одном мониторинговании. На рис. 10 приведен временной ряд, полученный синхфазным вычитанием диастолического давления из систолического. Достаточно большое значение разности (до 40 ед.) говорит о значимости изучения разностного и диастолического рядов.

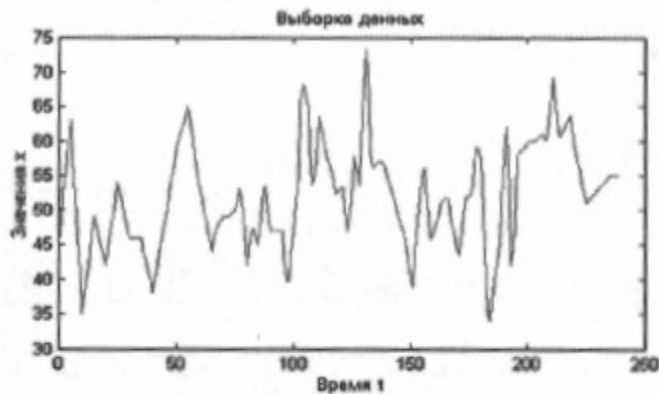
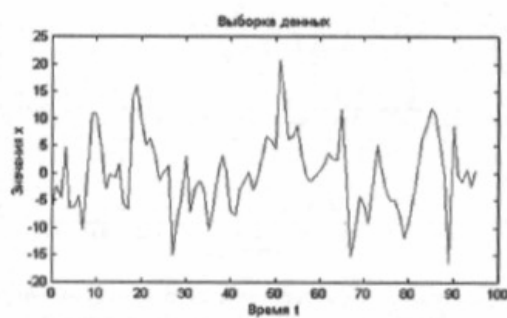


Рис. 10. Временной ряд, полученный как разность САД и ДАД здорового человека

На рис. 11, 12 приведены спектральные характеристики разностного, на рис. 13–15 диастолического ряда здорового человека.



Статистическая информация	
Количество точек	384
Минимальное значение	-16.517926
Максимальное значение	20.567603
Диапазон	37.085528
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	7.003419
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	6.966847
Медиана	-0.521460
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	48.536957
Момент порядка 3	83.282046
Момент порядка 4	7573.647980
Момент порядка 5	34749.852968
Средний квадрат	48.536957
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	24.268479

Рис. 11. Разностный ряд АД здорового человека и его статистика

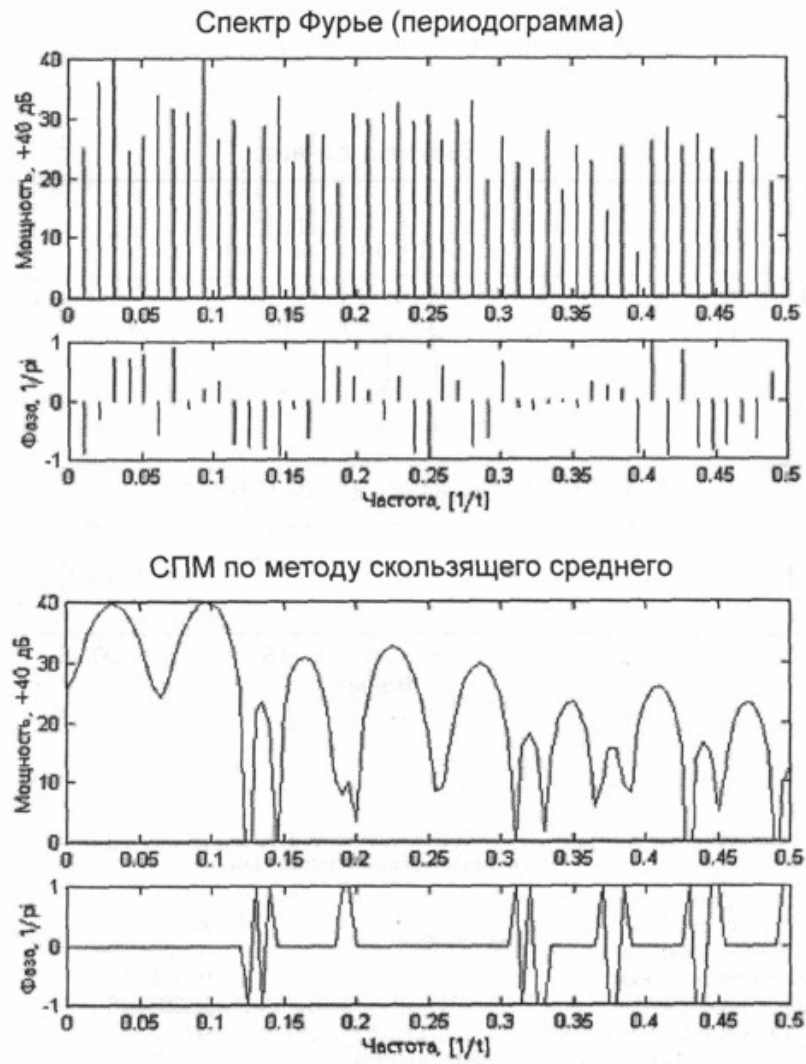
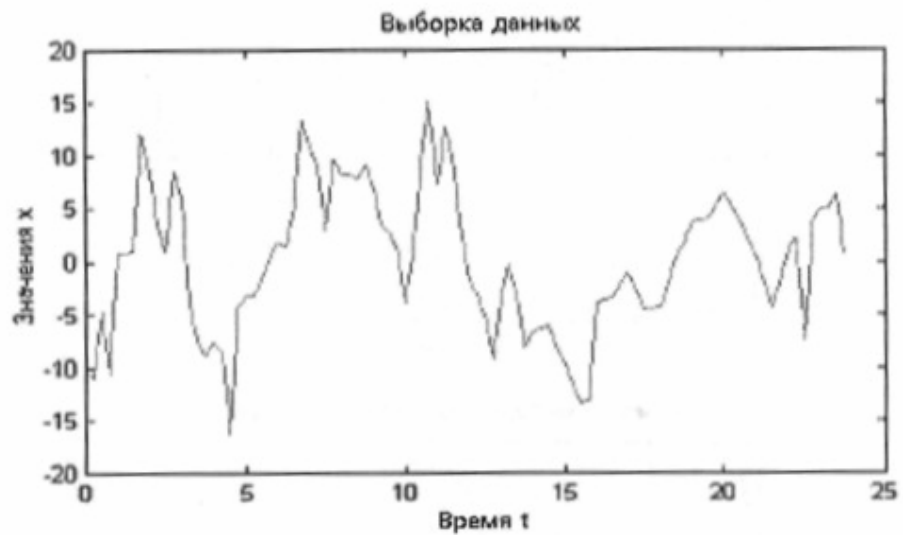


Рис. 12. Спектральные характеристики разностного ряда АД здорового человека



Статистическая информация

Количество точек	96
Минимальное значение	-16.267279
Максимальное значение	15.128252
Диапазон	31.395530
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	6.720961
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	6.685864
Медиана	0.573391
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	44.700783
Момент порядка 3	-6.399983
Момент порядка 4	4923.337344
Момент порядка 5	-3424.119714
Средний квадрат	44.700783
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	23.043539

Рис. 13. Исходный ряд и статистика временного ряда диастолического давления здорового человека

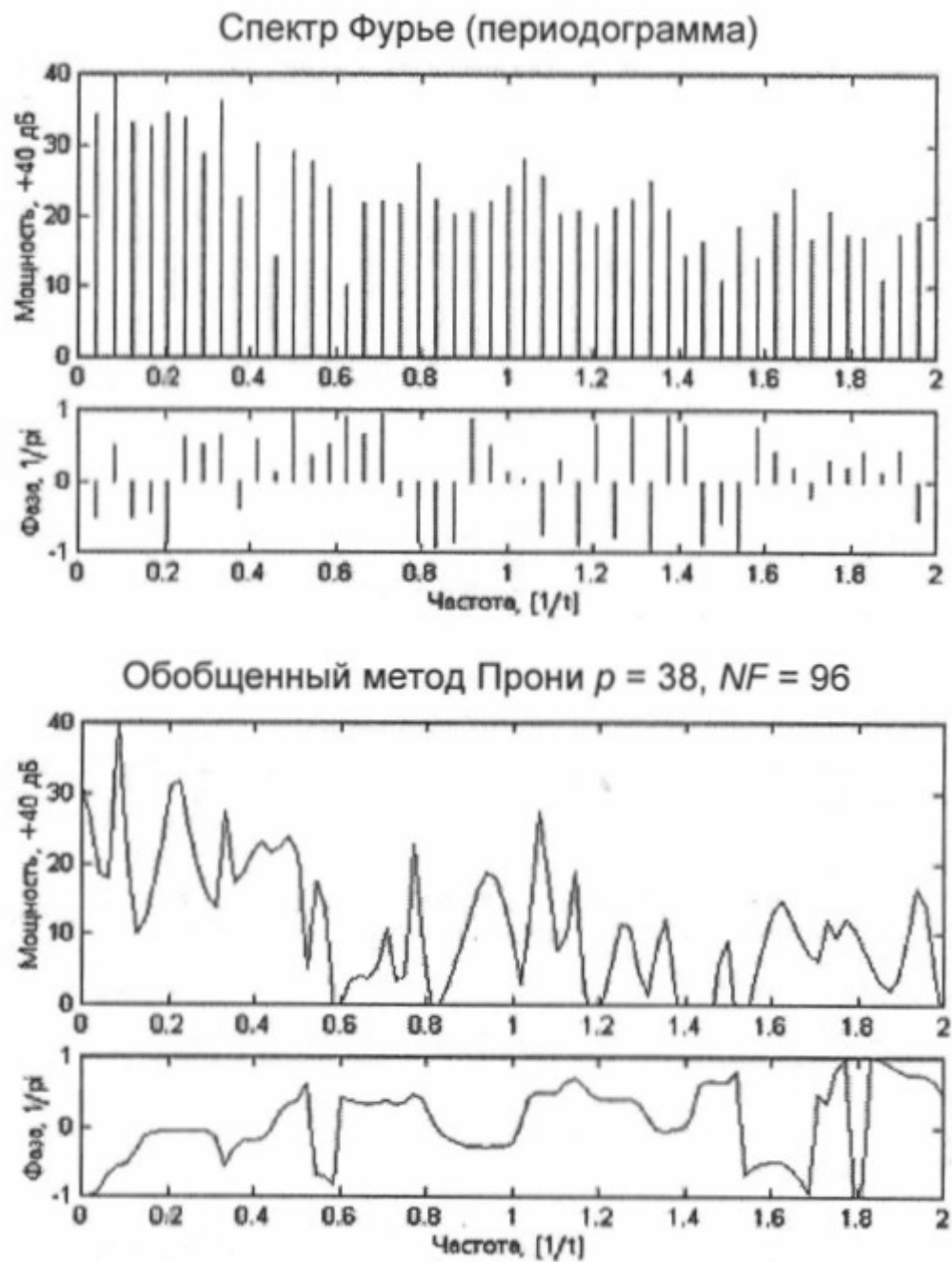


Рис. 14. Спектральные характеристики временного ряда диастолического давления здорового человека

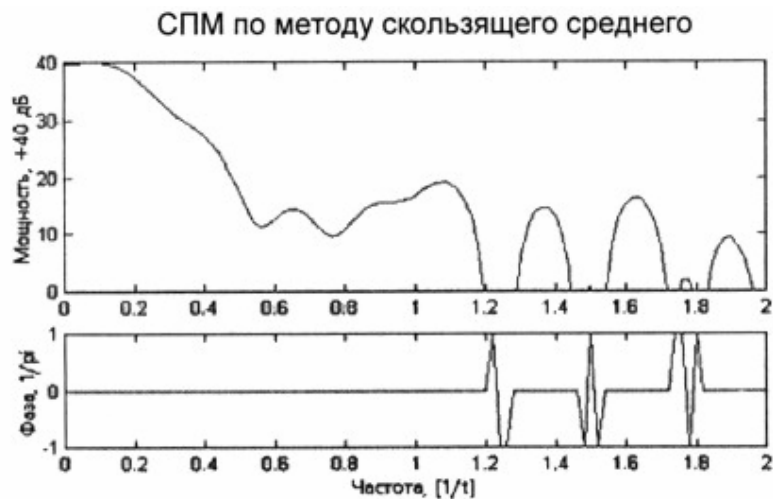
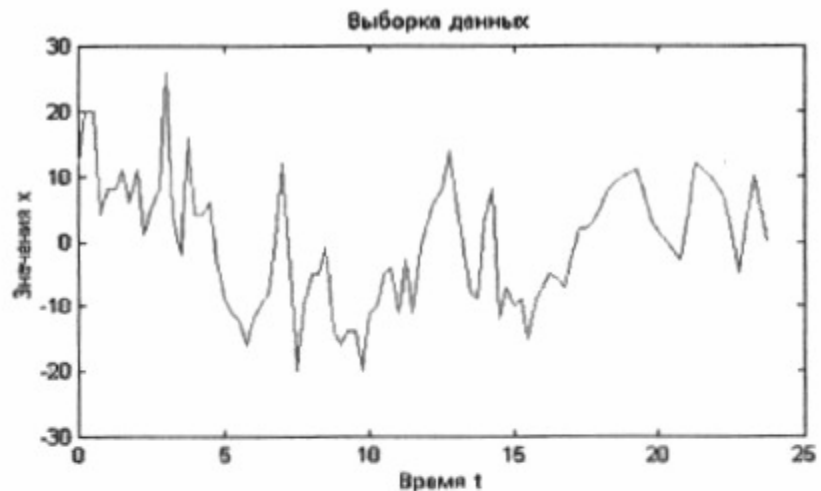


Рис. 15. Спектральная характеристика временного ряда диастолического давления здорового человека

На рис. 16–18 приведены спектральные характеристики и статистика временного ряда ДАД больного человека.

Сравнивая полученные характеристики с аналогичными на рис. 3, 4 и 5, 6, можно заметить, что ширина спектра у больного и здорового человека (набор цикличностей) достаточно близка (от 0 до 1,8) $1/t$, у разностного ряда она значительно меньше (от 0 до 0,35) $1/t$.

Кроме того, цикличности временных рядов ДАД и САД достаточно близки по периоду (частоте). Можно предположить, что они вызваны одними причинами.



Статистическая информация

Количество точек	96
Минимальное значение	-20.007707
Максимальное значение	26.000900
Диапазон	46.008607
Среднее значение	-0.000000
Стандартное отклонение (несмещенная оценка)	9.481274
Стандартное отклонение (центрированная оценка)	9.431763
Медиана	0.486077
Момент порядка 1	0.000000
Момент порядка 2	88.958147
Момент порядка 3	57.791973
Момент порядка 4	20008.019034
Момент порядка 5	93791.576096
Средний квадрат	88.958147
Энтропия	Inf
Удельная энтропия	45.172221

Рис. 16. Исходный ряд и статистика временного ряда диастолического давления больного человека

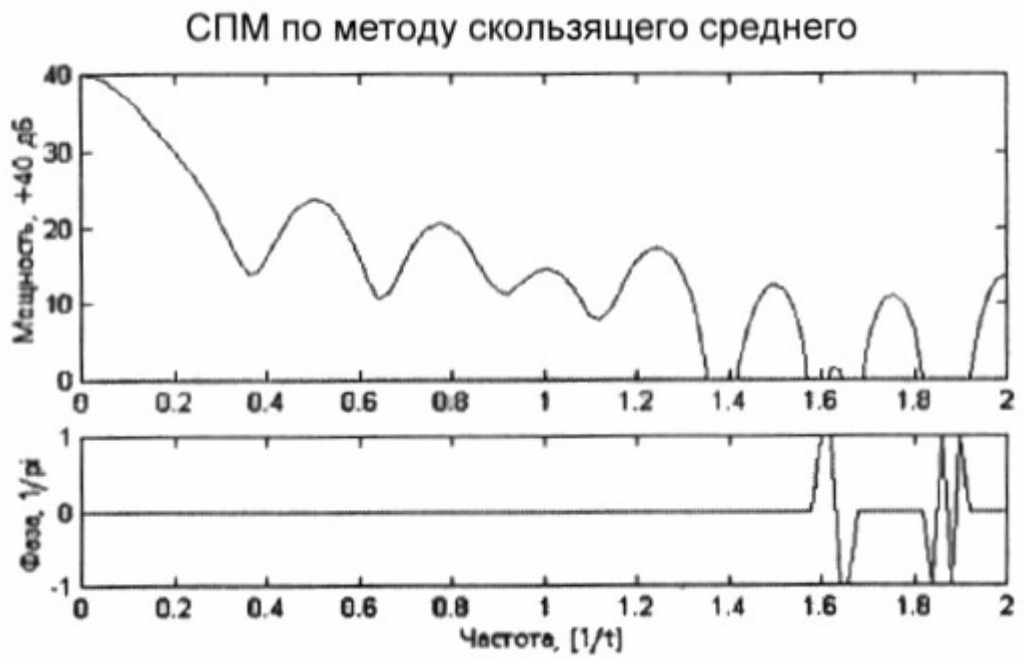


Рис. 17. Спектральная характеристика временного ряда диастолического давления больного человека

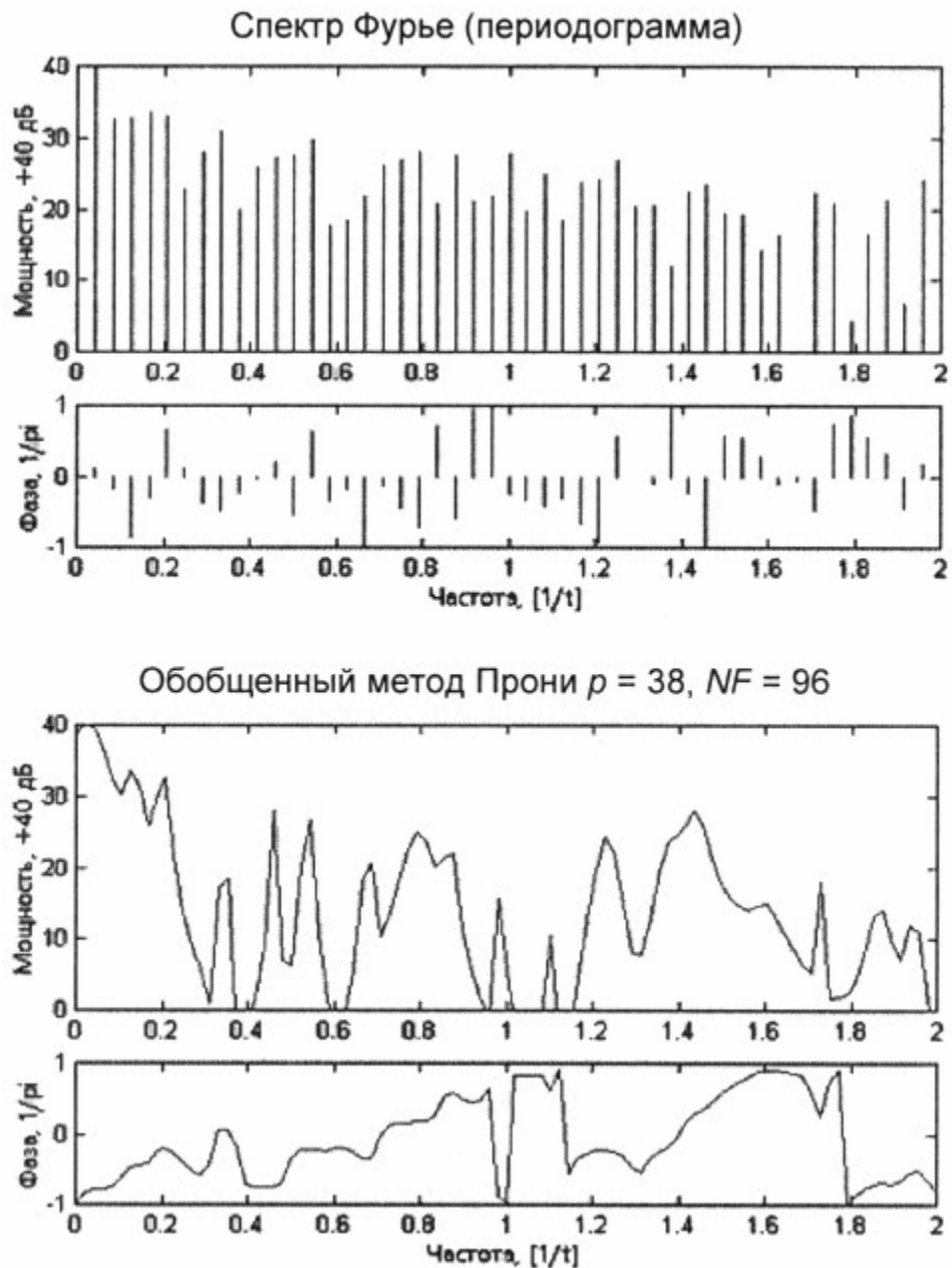


Рис. 18. Спектральные характеристики временного ряда диастолического давления больного человека

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Сравнительный анализ временных рядов суточного мониторинга является средством для получения новой информации о наличии некоторых цикличностей, влияющих на величину и скорость изменения давления.
2. Достоверность сравнительного анализа временных рядов ДАД и САД зависит от качества предварительной подготовки данных: удаление случайных пульсаций, заполнение пропусков (как случайных, так запрограммированных в ночной период), удаление линейного тренда и среднего значения (централизация).
3. Динамики временных рядов ДАД и САД достаточно близки, но разностные ряды имеют значительно меньшую ширину спектра пульсаций. Для подтверждения этого вывода необходимо провести исследования взаимно корреляционных свойств рядов ДАД и САД.

Литература

1. Храмцова О. М., Кустова И. И., Загайнов В. В., Андреев П. В. Клиническое значение суточного мониторинга артериального давления при артериальной гипертензии (обзор литературы) // Уральский кардиологический журнал. 2001. Вып. 3. С. 25–30.
2. Хаятин В. М., Лукошкова Е. В. Колебания частоты сердечбиений: Спектральный анализ. М.: Вестник аритмологии. 2002. № 26. С. 10–21.
3. Morgan T., Anderson A. How important is 24-hour control of blood pressure? // Drug Saf. 1996 Oct; 15(4):243-8.
4. Кобалова Ж. Д., Котовская Ю. В., Моисеев В. С. Особенности утреннего подъема артериального давления у больных гипертонической болезнью с различными вариантами суточного ритма // Кардиология. 1999. № 6. С. 23–26.
5. Гапон Л. И., Губин Г. Д., Губин Д. Г., Середа Т. В., Тонконог И. М., Шуркевич Н. П. Особенности циркадианных ритмов артериального давления и частоты сердечных сокращений у больных артериальной гипертензией, постоянно проживающих в условиях Тюменского Приполярья // Клиническая медицина. Ru. 2002. Т. 80, № 8. С. 14–17.
6. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
7. Цибульский В. Р., Сергейчик О. И., Кузнецов В. А. Исследование зависимости частотных характеристик электрокардиограмм от изменения сегмента ST // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 38–45.
8. Кобалава Ж. Д., Котовская Ю. В. Мониторирование артериального давления: методические аспекты и клиническое значение. М., 1999. 234 с.
9. Леонтьева И. В., Агапитов Л. И. Суточное мониторирование артериального давления в дифференциальной диагностике артериальной гипертензии у подростков // Российский кардиологический журнал. 2000. № 4(24). С. 18–22.
10. Остроумова О. Д., Гусева Т. Ф., Абакумов Ю. Г., Батутина А. М. Вариабельность систолического и диастолического артериального давления при артериальной гипертензии: клиническая значимость, возможные патогенетические механизмы // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2003. № 2. С. 91–94.

N. Yu. Savelyeva, A. Yu. Zherzhova, O. I. Sergejchik, O. P. Vasilyeva

SPECTRUM ANALYSIS OF DAILY BLOOD PRESSURE MONITORING

The article describes particulars of spectrum analysis with regard to cardiogenic time series of blood pressure. A comparative analysis of systolic and diastolic pressure between a healthy person and the one suffering from hypertension has revealed presence of certain cyclicities influencing values and velocity of blood pressure dynamics.