

block in heart transplant recipients. *Am J Cardiol* 2006; 98: 1288–1290.

12. Cohn WE, Gregoric ID, Radovancevic B, et al. Atrial fibrillation after cardiac transplantation: experience in 498 consecutive cases. *Ann Thorac Surg* 2008; 85: 56–58.

13. Dizon J, Chen K, Bacchetta M, et al. A comparison of atrial arrhythmias after heart or double-lung transplantation at a single center. *J Am Coll Cardiol* 2009; 54: 2043–2048.

14. Khan M, Kalahasti V, Rajagopal V, et al. Incidence of atrial fibrillation in heart transplant patients: long-term follow-up. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2006; 17: 827–831.

15. Shumakov VI, Khubutiya MV, Beletskaya LV. Humoral rejection in heart transplantation. Moscow, 2003; 183 p. Russian (Шумаков В. И., Хубутия М. В., Белецкая Л. В. Отторжение гуморального типа при аллотрансплантации сердца. Москва, 2003; 183 с.)

16. Grant SC, Khan MA, Faragher EB, et al. Atrial arrhythmias and pacing after orthotopic heart transplantation: bivalvular versus standard atrial anastomosis. *Br Heart J* 1995; 74 (2): 149–153.

17. Elsik M, Teh A, Ling LH, et al. Supraventricular arrhythmias late after orthotopic cardiac transplantation: electrocardiographic and electrophysiological characterization and radiofrequency ablation. *Europace* 2012; 14 (10): 1498–1505.

18. Revishvili ASH, Serguladze SYu, Shmul' AV, et al. The combined (surgical and interventional) approach to the treatment of persistent atrial fibrillation. *Annaly Aritmologii* 2011; 8 (1): 62–67. Russian (Ревишвили А. Ш., Сергуладзе С. Ю. Шмуль А. В. и др. Комбинированный (хирургический и интервенционный) подход к лечению персистирующих форм фибрилляции предсердий. *Анналы аритмологии* 2011; 8 (1): 62–67.)

19. Cui G, Tung T, Kobashigawa J, et al. Increased incidence of atrial flutter associated with the rejection of heart transplantation. *Am J Cardiol* 2001; 88: 280–284.

20. Kautzner J, Peichl P, Čihák R, Málek I. Atrial flutter after orthotopic heart transplantation. *J Heart Lung Transplant* 2004; 23: 1463–1464.

21. Bokeriya LA, Filatov AG, Tarashvili EG. Contemporary strategy of pharmacologic treatment for atrial fibrillation. *Annaly Aritmologii* 2011; 8 (3): 5–13. Russian (Бокерия Л. А., Филатов А. Г., Тарашвили Е. Г. Современная стратегия фармакологического лечения фибрилляции предсердий. *Анналы аритмологии* 2011; 8 (3): 5–13.)

22. Arslan U, Memetoğlu ME, Kutlu R, et al. Preoperative HbA1c level in prediction of short-term morbidity and mortality outcomes following coronary artery bypass grafting surgery. *Russian Open Medical Journal* 2015; 4: e0204.

23. Bokeriya OL, Akhobekov AA, Shvartz VA, Kudzoeva ZF. Efficacy of statin therapy in the prevention of atrial fibrillation in early postoperative period after coronary artery bypass grafting.

Vestnik Rossijskoi Akademii Meditsinskikh Nauk 2015; 70 (3): 273–278. Russian (Бокерия О. Л., Ахобеков А. А., Шварц В. А., Кудзоева З. Ф. Эффективность приема статинов в первичной профилактике фибрилляции предсердий в раннем послеоперационном периоде изолированного аортокоронарного шунтирования. *Вестник РАМН* 2015; 70 (3): 273–278.)

24. Collins KK, Thiagarajan RR, Chin C, et al. Atrial tachyarrhythmias and permanent pacing after pediatric heart transplantation. *J Heart Lung Transplant* 2003; 22: 1126–1133.

25. Ahmari AL, Bunch TJ, Chandra A, et al. Prevalence, pathophysiology, and clinical significance of post-heart transplant atrial fibrillation and atrial flutter. *J Heart Lung Transplant* 2006; 25: 53–60.

26. Vaseghi M, Boyle NG, Kedia R, et al. Supraventricular tachycardia after orthotopic cardiac transplantation. *J Am Coll Cardiol* 2008; 51: 2241–2249.

27. Shumakov VI, Khubutiya MSh, Shevchenko OP. Rejection of the transplanted heart. Moscow, 2005; 240 p. Russian (Шумаков В. И., Хубутия М. Ш., Шевченко О. П. Отторжение трансплантированного сердца. Москва, 2005; 240 с.)

28. Dasari TW, Pavlovic-Surjancev B, Patel N, et al. Incidence, risk factors, and clinical outcomes of atrial fibrillation and atrial flutter after heart transplantation. *Am J Cardiol* 2010; 106: 737–741.

29. Baretto R, Debus B, Lin B, et al. Arrhythmia post heart transplantation. *Applied Cardiopulmonary Pathophysiology* 2011; 15: 256–271.

30. Ellenbogen KA, Thames MD, DiMarco JP, et al. Electrophysiological effects of adenosine in the transplanted human heart: evidence of supersensitivity. *Circulation* 1990; 81: 821–828.

31. Teh AW, Medi C, Rosso R, et al. ECG and electrophysiological characterisation and radiofrequency ablation of atrial arrhythmias late after orthotopic heart transplantation. *Heart Lung Circ* 2009; 18: 147–147.

32. Christie JD, Edwards LB, Kucheryavaya AY, et al. The Registry of the International Society for Heart and Lung Transplantation: twenty-seventh official adult lung and heart-lung transplant report — 2010. *J Heart Lung Transplant* 2010; 29: 1104–1118.

33. Vaseghi M, Lellouche N, Ritter H, et al. Mode and mechanisms of death after orthotopic heart transplantation. *Heart Rhythm* 2009; 6: 503–509.

34. Gognieva DG. Implantable cardioverter-defibrillator in preventing sudden cardiac death in adults. *Bulletin of Medical Internet Conferences* 2015; 5 (8): 1091–1098. Russian (Гогниева Д. Г. Имплантируемые кардиовертеры-дефибрилляторы в профилактике внезапной сердечной смерти у взрослых. *Бюллетень медицинских интернет-конференций* 2015; 5 (8): 1091–1098.)

УДК: 537.86

Оригинальная статья

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ВАРИАбельНОСТИ РИТМА СЕРДЦА И КРОВЕНАПОЛНЕНИЯ ДИСТАЛЬНОГО СОСУДИСТОГО РУСЛА У ЗДОРОВЫХ ЛИЦ И ПАЦИЕНТОВ, ПЕРЕНЕСШИХ ИНФАРКТ МИОКАРДА

В. А. Шварц — ФГБУ «НЦССХ им. А. Н. Бакулева», отделение хирургического лечения интерактивной патологии, младший научный сотрудник, кандидат медицинских наук; **А. С. Караваев** — ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, доцент кафедры математического моделирования и биомедицинской инженерии, кандидат физико-математических наук; **Е. И. Боровкова** — ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, кафедра математического моделирования и биомедицинской инженерии, аспирант; **С. А. Миронов** — ФГКУ «Центральный военный клинический госпиталь ФСБ России», врач-кардиолог, кандидат медицинских наук; **В. И. Пономаренко** — ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, профессор кафедры математического моделирования и биомедицинской инженерии, доктор физико-математических наук; **М. Д. Прохоров** — Саратовский филиал ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова» РАН, заведующий лабораторией моделирования в нелинейной динамике, доктор физико-математических наук; **А. А. Бутенко** — ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского» Минобрнауки РФ, старший преподаватель кафедры математического моделирования и биомедицинской инженерии; **В. И. Груднев** — ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского» Минздрава России, НИИ кардиологии, руководитель отдела продвижения новых кардиологических информационных технологий, доктор медицинских наук; **А. Р. Киселев** — ГБОУ ВПО «Саратовский ГМУ им. В. И. Разумовского» Минздрава России, НИИ кардиологии, ведущий научный сотрудник отдела продвижения новых кардиологических информационных технологий, доктор медицинских наук.

INVESTIGATION OF STATISTICAL CHARACTERISTICS OF INTERACTION BETWEEN THE LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN HEART RATE VARIABILITY AND PERIPHERAL MICROCIRCULATION IN HEALTHY SUBJECTS AND MYOCARDIAL INFARCTION PATIENTS

V.A. Shvartz — *Bakulev Scientific Center for Cardiovascular Surgery, Department of Surgical Treatment for Interactive Pathology, Junior Research Assistant, Candidate of Medical Sciences*; **A.S. Karavaev** — *Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Department of Nano- and Biomedical Technologies, Assistant Professor, Candidate of Physical and Mathematical Sciences*; **E.I. Borovkova** — *Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Department of Nano- and Biomedical Technologies, Post-graduate*; **S.A. Mironov** — *Moscow Central Clinical Military Hospital, Candidate of Medical Sciences*; **V.I. Ponomarenko** — *Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Department of Nano- and Biomedical Technologies, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences*; **M.D. Prokhorov** — *Saratov Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics, Head of Laboratory, Doctor of Physical and Mathematical Sciences*; **A.A. Butenko** — *Saratov State University n.a. N.G. Chernyshevsky, Department of Nano- and Biomedical Technologies, Senior Lecturer*; **V.I. Gridnev** — *Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Scientific Research Institute of Cardiology, Head of Department of New Cardiological Informational Technologies, Doctor of Medical Sciences*; **A.R. Kiselev** — *Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Scientific Research Institute of Cardiology, Department of New Cardiological Informational Technologies, Chief Research Assistant, Doctor of Medical Sciences*.

Дата поступления — 15.10.2015 г.

Дата принятия в печать — 10.12.2015 г.

Шварц В.А., Караваев А.С., Боровкова Е.И., Миронов С.А., Пономаренко В.И., Прохоров М.Д., Бутенко А.А., Гріднев В.И., Киселев А.Р. Изучение статистических характеристик взаимодействия низкочастотных колебаний в вариабельности ритма сердца и кровенаполнения дистального сосудистого русла у здоровых лиц и пациентов, перенесших инфаркт миокарда. Саратовский научно-медицинский журнал 2015; 11 (4): 537–542.

Цель: сопоставление статистических характеристик взаимодействия 0,1 Гц-колебаний в вариабельности сердечного ритма (ВСР) и фотоплетизмограмме (ФПГ) у здоровых лиц и пациентов, перенесших инфаркт миокарда (ИМ). **Материал и методы.** В исследование было включено 23 здоровых испытуемых (20 мужчин и 3 женщины; 26±3 года) и 23 пациента (12 мужчин и 11 женщин; 52±4 года), перенесших инфаркт миокарда (ИМ) около месяца назад. Изучались 10-минутные синхронные записи кардиоинтерваллограммы (КИГ) и ФПГ. Вычислялся суммарный процент фазовой синхронизации 0,1 Гц-колебаний, оценивались функции плотности распределения вероятностей длительностей синхронных и несинхронных временных участков, изменчивость основной частоты колебаний, дисперсия фазовых шумов для 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ФПГ. **Результаты.** Суммарный процент синхронизации 0,1 Гц-колебаний у здоровых лиц был значимо выше, чем у пациентов, перенесших ИМ: 47±3 и 26±4% соответственно. Значимых различий между группами по распределениям длительностей участков синхронизации и десинхронизации не выявлено. Пациенты, перенесшие ИМ, характеризовались большей степенью несовпадения основных частот 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ФПГ, чем здоровые лица, что ассоциировано с повышенным уровнем фазовых шумов. **Заключение.** Качество синхронизации 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ФПГ ассоциировано со степенью влияния внешних факторов (шумов) и изменчивостью основной частоты данных колебаний.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, фазовая синхронизация, временные ряды, низкочастотные колебания.

Shvartz VA, Karavaev AS, Borovkova EI, Mironov SA, Ponomarenko VI, Prokhorov MD, Butenko AA, Gridnev VI, Kiselev AR. Investigation of statistical characteristics of interaction between the low-frequency oscillations in heart rate variability and peripheral microcirculation in healthy subjects and myocardial infarction patients. *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2015; 11 (4): 537–542.

Objective. This study compares the statistical characteristics of interaction between 0.1 Hz oscillations in heart rate variability (HRV) and photoplethysmogram (PPG) in healthy subjects and myocardial infarction (MI) patients. **Material and methods.** We studied 23 healthy subjects (20 men and 3 women aged 26±3 years) and 23 patients (12 men and 11 women aged 52±4 years) at about one month after MI. The 10-minute signals of simultaneously recorded cardiointervallogram (CIG) and PPG were studied. We calculated the total percentage of phase synchronization between the studied 0.1 Hz oscillations and estimated the distribution functions of duration of synchronous and non-synchronous epochs, the variability of basic frequency of oscillations, and variance of phase noises in 0.1 Hz oscillations in HRV and PPG. **Results.** The total percentage of phase synchronization between 0.1 Hz oscillations is significantly greater in healthy subjects than in MI patients (47±3% and 26±4%, respectively). Significant difference between these two groups in the distribution of duration of synchronous and non-synchronous epochs was not revealed. The MI patients had greater variance between the basic frequencies of 0.1 Hz oscillations in HRV and PPG than healthy subjects. This phenomenon correlates with the increased level of phase noises in the records of MI patients. **Conclusion.** The quality of synchronization between 0.1 Hz oscillations in HRV and PPG is associated with the strength of influence of external factors (noises) and variability of the basic frequency of these oscillations.

Key words: cardiovascular system, phase synchronization, time series, low-frequency oscillations.

Введение. Низкочастотные колебания в сердечно-сосудистой системе привлекают в последнее время внимание исследователей [1–3]. Данные колебания с основной частотой около 0,1 Гц выявляются, в частности, в вариабельности сердечного ритма (ВСР), артериального давления и вариабельности кровенаполнения дистального сосудистого русла (ВКДР). Относительно природы 0,1 Гц-колебаний доминируют представления об их барорефлекторного происхождения [4, 5]. Имеются доказательства функциональной независимости механизмов веге-

тативной регуляции кровообращения, обуславливающих низкочастотные колебания в ВСР и ВКДР [6, 7]. При этом данные регуляторные процессы активно взаимодействуют друг с другом, что проявляется, в частности, фазово-частотной синхронизацией, описанной нами ранее [8]. Однако даже у здоровых лиц синхронизация 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР не постоянна, что стало основой создания количественной меры оценки синхронизованности данных колебаний — суммарного процента фазовой синхронизации, измеряемого в процентах [9]. Данный показатель уже доказал свое потенциально важное значение для клинической кардиологии, в частности для оценки пятилетнего фатального риска после пе-

Ответственный автор — Киселев Антон Робертович
Тел.: +7 (8452) 201899
E-mail: kiselev@cardio-it.ru

ренесенного инфаркта миокарда (ИМ) и индивидуализации медикаментозной терапии при ишемической болезни сердца (ИБС) и артериальной гипертензии [10–12].

Тем не менее суммарный процент фазовой синхронизации позволяет оценить только долю времени, когда 0,1 Гц-колебания в ВСР и ВКДР синхронизованы, относительно общей длительности наблюдения (в наших предшествующих работах длительность записей составляла 10 минут). У здоровых лиц значения данного показателя варьируют в достаточно широких пределах (от 20 до 60%), статистически значимо, однако, отличаясь от пациентов с ИБС, в частности с перенесенным ИМ [8]. Очевидно, что подобная оценка степени взаимодействия механизмов вегетативной регуляции разных отделов сердечно-сосудистой системы является обобщенной и не позволяет изучать происходящие в системе регуляторные процессы в деталях, таких как изменчивость длительности участков фазово-частотной синхронизации во времени, изменчивость длительности участков асинхронного поведения, степень десинхронии, значение влияния внешних факторов на регуляцию. Развитие углубленных критериев изучения взаимодействия низкочастотных колебаний в системе кровообращения представляется перспективным как для фундаментальной, так и клинической кардиологии.

Для разведочного изучения потенциальных возможностей углубленного анализа динамических свойств взаимодействия 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР можно использовать достаточно полярные по состоянию вегетативной регуляции кровообращения группы, такие как здоровые молодые лица и пациенты с ИБС, перенесшие ИМ.

Целью данной работы является сопоставление статистических характеристик взаимодействия низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР у здоровых лиц и пациентов, перенесших ИМ.

Материал и методы. В исследование было включено две группы испытуемых:

1) 23 человека (20 мужчин и 3 женщины; возраст 26 ± 3 года) без признаков сердечно-сосудистой патологии;

2) 23 пациента (12 мужчин и 11 женщин; возраст 52 ± 4 года), перенесших инфаркт миокарда (ИМ) около месяца назад. Пациенты находились на стационарном лечении в клинике Саратовского НИИ кардиологии.

Для каждого испытуемого в положении лежа проводилась одновременная регистрация сигналов электрокардиограммы (ЭКГ) во II стандартном отведении по Эйнтховену и фотоплетизмограммы (ФПГ) с дистальной фаланги безымянного пальца левой руки в состоянии покоя с частотой дискретизации 250 Гц при разрешении 14-бит. Из сигнала ЭКГ выделялся сигнал кардиоинтерваллограммы (КИГ) — последовательность временных интервалов между двумя последовательными R-пиками. Далее синтезировался эквидистантный сигнал КИГ с помощью интерполяции неэквидистантной зависимости кубическими β-сплайнами с частотой дискретизации 5 Гц.

Сигналы КИГ и ФПГ фильтровались полосовым фильтром в полосе частот [0,06, 0,14] Гц для выделения ритмов, отражающих активность исследуемых регуляторных систем. Частоты дискретизации выделенного из ФПГ сигнала ограничивались с помощью децимации до 5 Гц. С помощью преобразования Гильберта выделялись мгновенные фазы колебаний

исследуемых регуляторных систем и вычислялась разность фаз.

Далее с помощью метода, предложенного в одной из наших ранее выполненных работ [9], определялись границы интервалов фазовой синхронизации и оценивались функции плотности распределения вероятностей (ФПРВ) длительностей синхронных и несинхронных временных участков у здоровых лиц и у пациентов, перенесших ИМ. Вычислялся также суммарный процент фазовой синхронизации, согласного методике, описанной в нами ранее [9].

Изменчивость основной частоты низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР оценивали на основе ФПРВ углов наклона аппроксимирующих прямых на несинхронных участках записей. Оценивались распределения разностей мгновенных частот колебаний, определяющих скорость нарастания мгновенной разности фаз для обеих групп испытуемых.

Важным при изучении фазовой динамики систем биологической природы является вопрос о природе и свойствах фазового шума, который включает составляющую, зависящую от свойств измерительного шума, но в основном определяется внутренними динамическими шумами [13–15]. С целью сравнительного изучения интенсивности суммарного влияния внешних и внутренних факторов на взаимодействие низкочастотных механизмов вегетативной регуляции кровообращения была изучена дисперсия фазовых шумов для 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР. Для выделения фазового шума в нашей работе использовалась специальная процедура. Фазовый шум рассматривался как остатки модели скользящего среднего сигнала $\Delta\varphi(t)$. Для оценки его характеристик из экспериментальных разностей фаз вычитались тренды, аппроксимируемые моделью скользящего среднего с временным окном длительностью 20 с (два характерных периода колебаний). В работе оценивались статистические и спектральные свойства остатков таких моделей.

Результаты. Значение суммарного процента синхронизации 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР в группе здоровых лиц составило $47 \pm 3\%$, а в группе пациентов, перенесших ИМ, $26 \pm 4\%$ (данные представлены в виде среднего и стандартного отклонения $M \pm SD$).

Для детального изучения статистических особенностей взаимодействия низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР использовался анализ их фазовой динамики. Для обеих изучаемых групп испытуемых построены выборочные функции распределения длительностей синхронных (рис. 1а) и несинхронных (рис. 1б) участков записей с позиции взаимодействия 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР. Выявлено, что в обеих группах преобладают относительно короткие временные участки синхронизации (около 30–70 секунд), которые чередуются с сопоставимыми по длительности участками десинхронизации. Значимых различий между здоровыми лицами и пациентами, перенесшими ИМ, по распределениям длительностей участков синхронизации и десинхронизации изучаемых низкочастотных колебаний не выявлено.

Результаты изучения изменчивости основной частоты низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР на основе ФПРВ углов наклона аппроксимирующих прямых на несинхронных участках записей представлены на рис. 2. Приведенные кривые имеют смысл выборочного распределения разности мгновенных частот изучаемых колебаний в ВСР и ВКДР. Например, если мгновенная частота изучаемых колебаний в ВСР составляет 0,105 Гц, а в ВКДР 0,100 Гц,

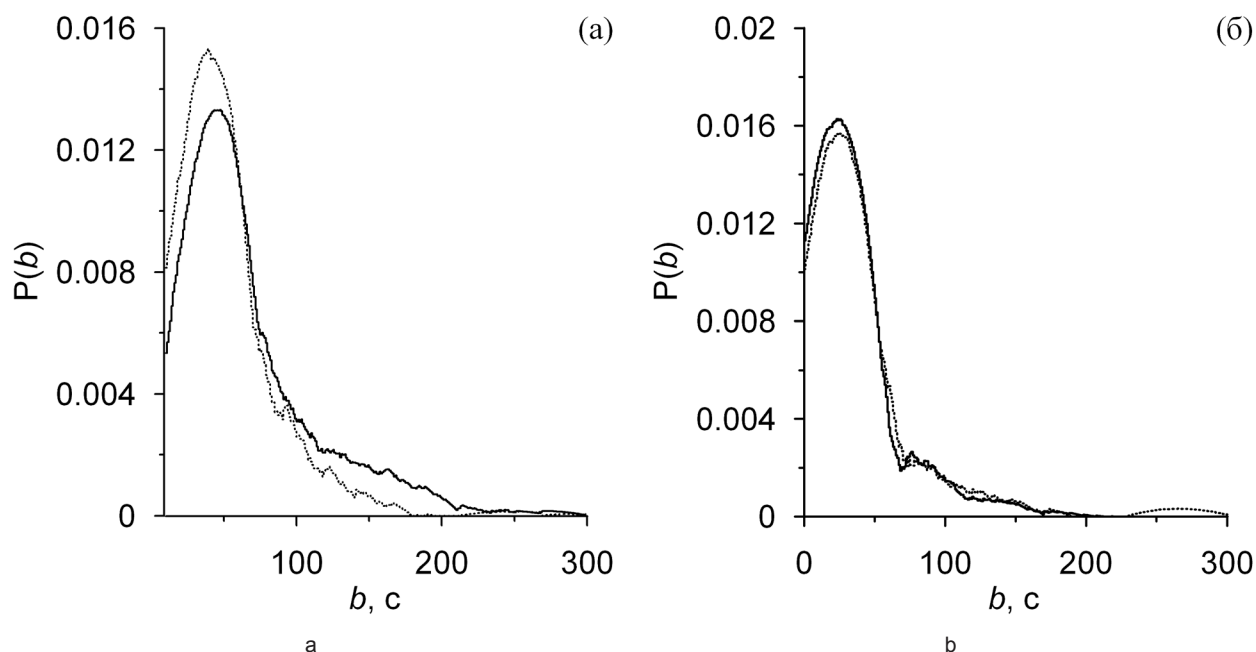


Рис. 1. Выборочные функции распределения плотности вероятностей ($P(b)$) длительностей (b) синхронных (а) и несинхронных (б) участков записей 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР у здоровых обследуемых (сплошная линия) и больных, перенесших ИМ (пунктир)

то мгновенная разница частот (отложено по оси X на рис. 2) составит 0,005 Гц. Данная разница меняется в определенном диапазоне в течение всей записи сигналов ЭКГ и ФПГ. При совпадении частот обоих колебаний разница равна нулю. Выявлено, что пациенты, перенесшие ИМ, характеризуются существенно большей степенью несовпадения основных частот низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР, чем здоровые лица.

Результаты сравнительного изучения интенсивности суммарного влияния неучтенных внешних и внутренних факторов на взаимодействие низкочастотных механизмов вегетативной регуляции кровообращения представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что распределения фазовых шумов близки к нормальным. Среднее значение дисперсии фазового шума (вычислялось как среднее от дисперсий шума для каждого испытуемого) для здоровых лиц (рис. 3а) составило $0,040 \pm 0,002$, а для пациентов, перенесших ИМ (рис. 3б), $0,070 \pm 0,004$ (данные представлены в виде среднего и его ошибки $M \pm m$). Таким образом, выявлен интересный факт: у больных интенсивность фазового шума почти в 2 раза выше, чем у здоровых.

Результаты спектрального анализа фазовых шумов представлены на рис. 4. Максимумы в спектрах наблюдаются в районе 0,05 Гц и могут отражать флуктуации, связанные с процессами гуморальной регуляции.

Обсуждение. Изучение свойств колебательных процессов в сердечно-сосудистой системе позволяет лучше понять особенности происходящих в ней физиологических процессов. Известно, что низкочастотные колебания в кровообращении характеризуются спонтанностью и способностью модулироваться [2]. Барорефлекторная природа подобных колебаний в артериальном давлении в настоящее время не вызывает сомнений [4, 5, 16], тогда как происхождение 0,1 Гц-колебаний в КДСР остается дискуссионным вопросом. Особенно это важно учитывать при анализе низкочастотных колебаний в сигнале ФПГ и

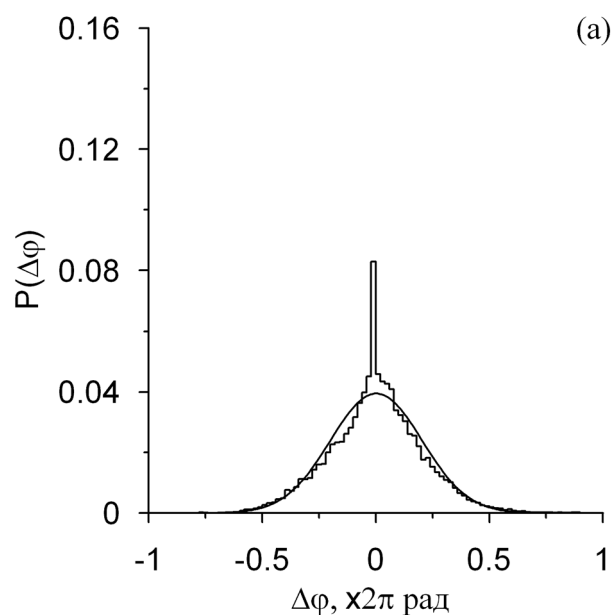


Рис. 2. Гистограммы распределения ($P(\Delta f)$) разницы мгновенных частот колебаний (Δf) исследуемых контуров вегетативной регуляции у здоровых лиц (сплошная линия) и пациентов, перенесших ИМ (пунктир)

лазерной доплер-флоуметрии (ЛДФ). В ФПГ существенный вклад вносят колебания кровенаполнения пальцевых артерий [17, 18], соответственно 0,1 Гц-колебания в данном типе сигнала преимущественно характеризуют барорефлекторную регуляцию АД, тогда как низкочастотные колебания, выявляемые в ЛДФ, характеризуют в большей мере спонтанную вазомоторную активность [19].

Функциональная независимость 0,1 Гц-колебаний в ВСР и АД (в том числе ФПГ) [7, 20] и возможность синхронизации между ними [8, 20] позволяют рассматривать вегетативную регуляцию кровообращения как сложную нелинейную систему с несколькими автоколебательными контурами. Однако, несмотря

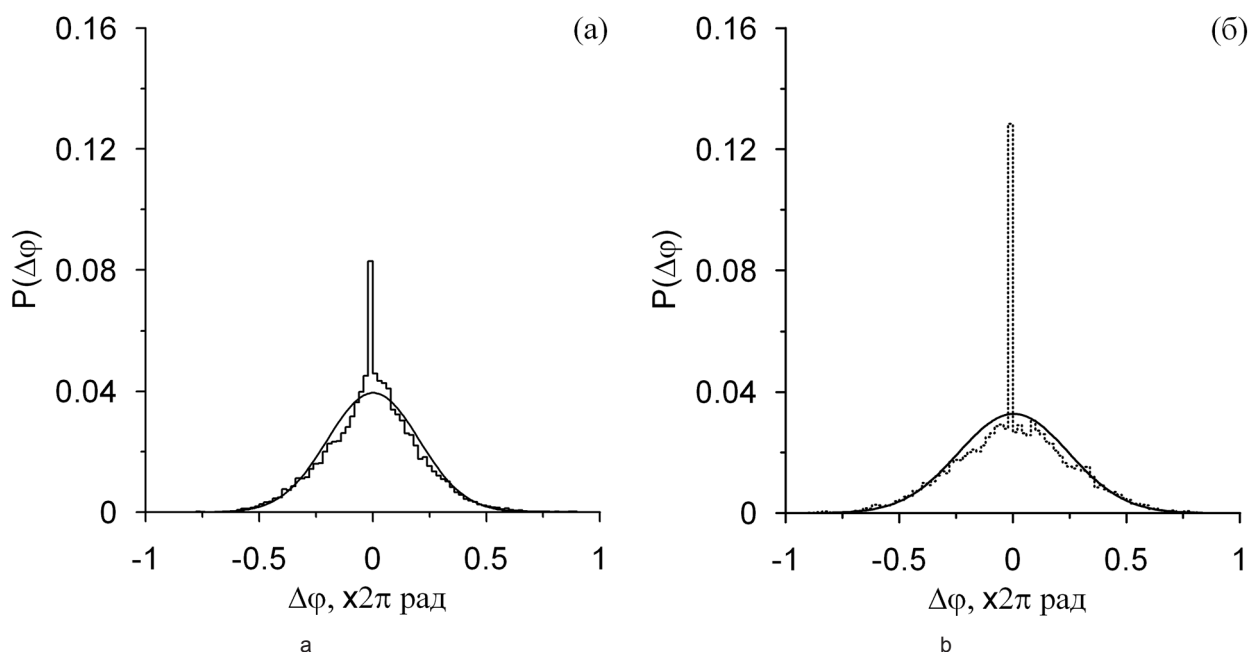


Рис. 3. Распределение фазового шума для выборки здоровых лиц (а) и больных ИМ (б), аппроксимированные Гауссовским распределением

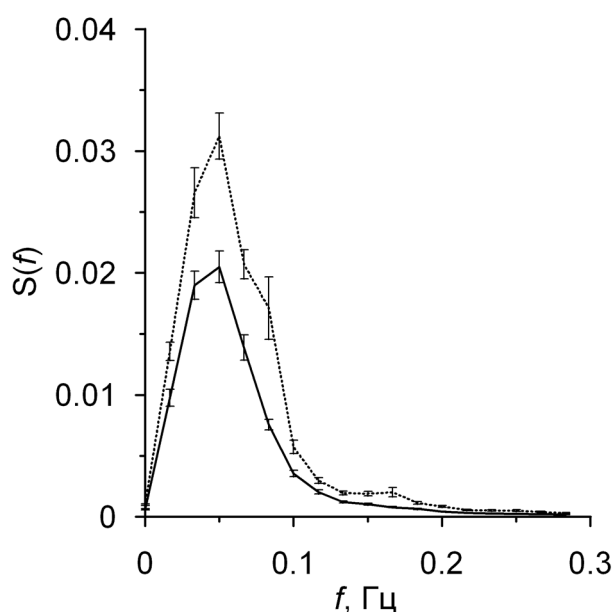


Рис. 4. Оценки спектральных плотностей мощности фазового шума для выборки здоровых лиц (сплошная линия) и больных ИМ (пунктир) (приведены с отложенными ошибками оценки среднего)

на очевидные перспективы анализа синхронизации 0,1 Гц-колебаний [10–12], особенности данного явления оставались неизученными. В представленной работе впервые показано, что качество взаимодействия низкочастотных механизмов вегетативной регуляции кровообращения ассоциировано со степенью модуляции основных частот данных колебаний под действием различных факторов, выражающихся в фазовых шумах. В частности, у пациентов, перенесших ИМ, доля фазового шума в 0,1 Гц-колебаниях в ВСР и ВКДР существенно выше, чем у здоровых лиц. Данный факт может быть обусловлен как повышенной чувствительностью вегетативной регуляции к внешним факторам у данных пациентов, так и вли-

янием более сильных факторов, связанных с патогенезом сердечно-сосудистой патологии. Повышенная изменчивость основной частоты низкочастотных колебаний у пациентов также может являться критерием общей функциональной нестабильности регуляторной системы под действием подобных внешних факторов.

При этом, несмотря на то, что продолжительность каждого участка синхронизации у здоровых лиц и пациентов с перенесенным ИМ имеет очень небольшие различия (порядка нескольких секунд), общее время десинхронизации 0,1 Гц-колебаний у пациентов существенно больше.

Заключение. Выявлено, что взаимодействие низкочастотных механизмов вегетативной регуляции кровообращения характеризуется чередованием преимущественно достаточно коротких (длительностью от 30 до 70 секунд) временных участков синхронизации и десинхронизации 0,1 Гц-колебаний в ВСР и ВКДР как у здоровых лиц, так и у пациентов, перенесших ИМ. Однако у последних система вегетативной регуляции кровообращения более подвержена влиянию различных внешних и внутренних факторов, что проявляется более высоким уровнем фазовых шумов в 0,1 Гц-колебаниях, выявляемых в ВСР и ВКДР, по сравнению со здоровыми лицами. Также пациенты, перенесшие ИМ, характеризуются существенно большей степенью несовпадения основных частот низкочастотных колебаний в ВСР и ВКДР, чем здоровые лица.

Конфликт интересов Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МД-4368.2015.7 и МК-2267.2014.8.

References (Литература)

1. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use: Task Force of the European Society of Cardiology the North American Society of Pacing Electrophysiology. *Circulation* 1996; 93: 1043–1065.
2. Obrig H, Neufang M, Wenzel R, et al. Spontaneous low frequency oscillations of cerebral hemodynamics and metabolism in human adults. *Neuroimage* 2000; 12: 623–639.

3. Song S, Kim D, Jang DP, et al. Low-frequency oscillations in cerebrovascular and cardiovascular hemodynamics: Their interrelationships and the effect of age. *Microvasc Res* 2015; 102: 46–53.
4. Burgess DE, Hundley JC, Brown DR, et al. First-order differential-delay equation for the baroreflex predicts the 0.4-Hz blood pressure rhythm in rats. *American Journal of Physiology* 1997; 273: R1878-R1884.
5. Ringwood JV, Malpas SC. Slow oscillations in blood pressure via a nonlinear feedback model. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2001; 280 (4): R1105-R1115.
6. Borovkova YI, Karavaev AS, Bezruchko BP, et al. Uncovering frequency locking for systems affected by chirping. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2011; 75 (12): 1601–1604. (Боровкова Е.И., Караваев А.С., Пономаренко В.И. и др. Диагностика частотного захвата в условиях воздействия сигналом переменной частоты. *Известия РАН. Серия Физическая* 2011; 75 (12): 1704–1708.)
7. Karavaev AS, Kiselev AR, Gridnev VI, et al. Phase and frequency locking of 0.1-Hz oscillations in heart rate and baroreflex control of blood pressure by breathing of linearly varying frequency as determined in healthy subjects. *Human Physiology* 2013; 39 (4): 416–425. (Караваев А.С., Киселев А.Р., Гриднев В.И. и др. Фазовый и частотный захват 0,1 Гц-колебаний в ритме сердца и барорефлекторной регуляции артериального давления дыханием с линейно меняющейся частотой у здоровых лиц. *Физиология человека* 2013; 39 (4): 93–104.)
8. Kiselev AR, Bespyatov AV, Posnenkova OM, et al. Internal synchronization of the main 0.1-Hz rhythms in the autonomic control of the cardiovascular system. *Human Physiology* 2007; 33 (2): 188–193. (Киселев А.Р., Беспятов А.Б., Посненкова О.М. и др. Внутренняя синхронизация основных 0,1Гц-частотных ритмов в системе вегетативного управления сердечно-сосудистой системой. *Физиология человека* 2007; 33 (2): 69–75.)
9. Kiselev AR, Gridnev VI, Karavaev AS, et al. The method of studying the synchronization of 0.1 Hz oscillations in heart rate variability and variability of microvascular blood flow. *Funktsional'naya Diagnostika* 2011; (4): 28–35. (Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С. и др. Метод изучения синхронизации 0,1 Гц колебаний в вариабельности ритма сердца и вариабельности кровенаполнения сосудов микроциркуляторного русла. *Функциональная диагностика* 2011; (4): 28–35.)
10. Kiselev AR, Gridnev VI, Karavaev AS, et al. Assessment of dynamics of the autonomic cardiovascular system regulation based on low-frequency rhythm synchronization in patients with ischemic heart diseases complicated by myocardial infarction treated with metoprolol. *Ter Arkh* 2007; 79 (4): 23–31.
11. Kiselev AR, Gridnev VI, Karavaev AS, et al. Evaluation of five-year risk of lethal outcome and development of cardiovascular disorders in patients with acute myocardial infarction on basis of 0.1-Hz rhythms synchronization in cardiovascular system. *Saratov Journal of Medical Scientific Research* 2010; 6 (2): 328–338. (Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С. и др. Оценка пятилетнего риска летального исхода и развития сердечно-сосудистых событий у пациентов с острым инфарктом миокарда на основе синхронизации 0,1 Гц-ритмов в сердечно-сосудистой системе. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2010; 6 (2): 328–338.)
12. Kiselev AR, Gridnev VI, Karavaev AS, et al. Individual approach to antihypertensive drug selection in hypertensive patients based on individual features of autonomic cardiovascular dysfunction. *Arterial Hypertension* 2011; 17 (4): 354–360. (Киселев А.Р., Гриднев В.И., Караваев А.С. и др. Персонализация подхода к назначению гипотензивной терапии у больных артериальной гипертензией на основе индивидуальных особенностей вегетативной дисфункции сердечно-сосудистой системы. *Артериальная гипертензия* 2011; 17 (4): 354–360.)
13. Bunde A, Havlin S, Kantelhardt JV, et al. Correlated and uncorrelated regions in heart-rate fluctuations during sleep. *Phys Rev Lett* 2000; 85: 3736–3739.
14. Togo F, Yamamoto Y. Decreased fractal component of human heart rate variability during non-REM sleep. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2001; 280 (1): H17-H21.
15. Kotani K, Struzik ZR, Takamasu K, et al. Model for complex heart rate dynamics in health and disease. *Physical Review E* 2005; 72: 041904.
16. Horsman HM, Peebles KC, Tzeng YC. Interactions between breathing rate and low-frequency fluctuations in blood pressure and cardiac intervals. *J Appl Physiol* 2015; 119 (7): 793–798.
17. Higgins JL, Fronck A. Photoplethysmographic evaluation of the relationship between skin reflectance and skin blood volume. *J Biomed Engineering* 1986; 8: 130–136.
18. Rhee S, Yang BH, Asada H. Theoretical evaluation of the influence of displacement on finger photoplethysmography for wearable health monitoring sensors. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Symposium on Dynamics, Control, and Design of Biomechanical Systems*. Nashville, Tennessee, November 14–19, 1999.
19. Stefanovska A, Bracic M, Kvernmo HD. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique. *IEEE Trans Biomed Eng* 1999; 46: 1230–1239.
20. Guasti L, Mainardi LT, Baselli G, et al. Components of arterial systolic pressure and RR-interval oscillation spectra in a case of baroreflex failure, a human open-loop model of vascular control. *J Hum Hypertens* 2010; 24 (6): 417–426.

УДК 614.2:613.9:616.12–008.331.1

Оригинальная статья

ГЕНДЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФАКТОРОВ РИСКА И КЛИНИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ АРТЕРИАЛЬНОЙ ГИПЕРТЕНЗИИ

Е.Ю. Шкатова — ГБОУ ВПО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России, заведующий кафедрой медицины катастроф и безопасности жизнедеятельности, доцент, доктор медицинских наук; **И.Н. Бакшаев** — ГБОУ ВПО «Ижевская государственная медицинская академия Минздрава» России, аспирант кафедры медицины катастроф и безопасности жизнедеятельности, инспектор-врач ФКУЗ «Медико-санитарная часть № 18» ФСИН России; **Г.С. Королькова** — «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России, аспирант кафедры общественного здоровья, экономики и управления здравоохранением ФПК и ПП.

GENDER FEATURES OF RISK FACTORS AND CLINICAL COURSE OF ARTERIAL HYPERTENSION

E. Yu. Shkatova — *Izhevsk State Medical Academy, Head of Department of Disaster Medicine and Safety, Assistant Professor, Doctor of Medical Sciences*; **I. N. Bakshaev** — *Izhevsk State Medical Academy, Department of Disaster Medicine and Life Safety, Post-graduate, Health Part № 18 of Federal Penitentiary Service of Russia*; **G. S. Korolkova** — *Izhevsk State Medical Academy, Department of Public Health, Economy and Health Management, Post-graduate.*

Дата поступления — 08.10.2015

Дата принятия в печать — 10.12.2015 г.

Шкатова Е.Ю., Бакшаев И.Н., Королькова Г.С. Гендерные особенности факторов риска и клинического течения артериальной гипертензии. *Саратовский научно-медицинский журнал* 2015; 11 (4): 542–547.