

УДК 621.391:004.93:616.12-073.97(075.8)621.38:61(0.75.8)

**ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛОВ ДЛЯ
ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОЙ
МИОКАРДИОДИСТРОФИИ¹**

*Иванушкина Н.Г.¹, к.т.н., доц.; Иванько Е.О.¹, к.т.н.; Чеснокова О.В.¹;
Чайковский И.А.^{2,3}, к.м.н., д.м.н.(ФРГ)*

¹*Национальный технический университет Украины «Киевский политехни-
ческий институт», Киев, Украина, n.ivanushkina@gmail.com*

²*Институт кибернетики НАН Украины, Киев, Украина*

³*Национальный военно-медицинский клинический центр «Главный военный
клинический госпиталь» МО Украины, Киев, Украина*

**WAVELET ANALYSIS OF THE ELECTROCARDIOSIGNALS FOR DETECTION
OF THE POSTTRAUMATIC MYOCARDIAL DYSTROPHY FEATURES**

Ivanushkina N., Ivanko K., Chesnokova O., Chaikovskiy I.,

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

*Institute for Cybernetics of NAS of Ukraine, Main Military Medical Clinical Center «ММЧ»
of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

Введение

В настоящее время наблюдается рост травматизма при дорожно-транспортных происшествиях, катастрофах, и, особенно, в зонах боевых действий. Травмы приводят не только к нарушению функций поражённого сегмента, но также и к общей реакции организма - травматической болезни. Как известно, травмы любой локализации вызывают заболевания сердечно-сосудистой системы разной степени тяжести [1,2].

Наиболее часто травматическая болезнь со стороны сердечно-сосудистой системы сопровождается миокардиодистрофией. Понятие «миокардиодистрофия» включает обратимые на ранних стадиях нарушения обмена веществ и энергообеспечения в миокарде, ведущие к недостаточности функций сердца при отсутствии структурных изменений [3].

Исследования на клеточном уровне показали, что при разнообразии факторов, воздействующих на сердце, в основе повреждения миокарда лежат нарушения энергообеспечения и транспорта ионов, с которыми связаны биоэнергетические процессы в кардиомиоците. Установлено, что патологические процессы, ведущие к нарушению транспорта ионов Ca²⁺ и к возникновению дефицита богатых энергией фосфорных соединений, играют основную роль в развитии миокардиодистрофии. При разной этиологии миокардиодистрофии увеличение проницаемости мембран миофибрилл

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/1221>

для Ca^{2+} или снижение активности кальциевого насоса приводит к повышению концентрации Ca^{2+} в саркоплазме, которое вызывает нарушение расслабления миофибрилл.

Процессы, связанные с кальцием, могут приводить либо к обратимому нарушению функции и структуры миокарда либо к возникновению в нем очагов некробиоза с дальнейшим рубцеванием и становиться основой некоронарогенного кардиосклероза. Дистрофия миокарда также проявляется недостаточностью сократительной функции сердца; реже наблюдаются нарушения сердечного ритма и совсем редко — нарушения проводимости.

С помощью электрокардиографии можно рано установить изменения, связанные с миокардиодистрофией, так как на ЭКГ отражаются многие нарушения обмена веществ. Признаками миокардиодистрофии на ЭКГ в ранний посттравматический период могут быть: удлинение интервала Q — T, укорочение длительности и уменьшение амплитуды зубца T в сравнении с должными значениями, общее уменьшение амплитуды зубцов и комплексов ЭКГ. Однако, в поздний травматический период изменения амплитудно-временных параметров ЭКГ становятся незначительными.

Для выявления низкоамплитудных компонент электрокардосигналов, которые могут отражать дисфункцию миокарда на клеточном уровне, предлагается применять неинвазивный метод электрокардиографии высокого разрешения (ЭКГ ВР). Целью работы является выявление признаков миокардиодистрофии на основе анализа электрокардосигналов системами ЭКГ ВР.

Особенности посттравматической миокардиодистрофии

Работа основана на клинических исследованиях 2-х групп пациентов: раненных военнослужащих (группа «раненные»), которые принимали участие в проведении АТО на востоке Украины, и спортсменов (группа «здоровые»). Военнослужащие (в возрасте в среднем - 33 ± 8 лет) находились на стационарном лечении в хирургических отделениях Национального военно-медицинского клинического центра «Главный военный клинический госпиталь» МО Украины с наличием травматических повреждений средней или тяжёлой степени из-за действия факторов взрыва.

При травматической болезни после минно-взрывной травмы развивается гипоксемия (уменьшение концентрации кислорода в крови) и эндотоксикоз (поступление в кровотоки продуктов распада тканей и сгустков крови), которые сопровождаются нарушениями работы сердечно-сосудистой системы. Как известно, от 6,4 % до 59,6 % случаев травм разной локализации характеризуются развитием посттравматической миокардиодистрофии [4].

Проявление миокардиодистрофии после взрывных ранений зависит от многих факторов: области поражения (сердца или других органов и тканей), наличия ожогов или химических отравлений, от степени стрессового

состояния организма, и может иметь локальный или диффузный характер.

Согласно [5] уделяется значительное внимание разработке методов диагностики и лечения болезни сердца для раннего травматического периода. Однако, для нормального исхода заболевания и полного выздоровления необходимо развитие методов и средств для оценивания состояния сердца в поздний травматический период на основе обнаружения тонких проявлений активности сердца.

Метод электрокардиографии высокого разрешения

ЭКГ ВР представляет неинвазивный метод (рис. 1), который включает в себя регистрацию электрокардиограммы с частотой дискретизации не менее 1 кГц и цифровую обработку сигнала.

Благодаря высокой частоте дискретизации и высокой разрядности (более 12-ти разрядов) аналого-цифрового преобразователя становится возможным диагностировать низкоамплитудные (до 20 мкВ) [7] высокочастотные составляющие ЭКГ сигнала, которые появляются при нарушениях в работе сердца и не видны на стандартной электрокардиограмме.

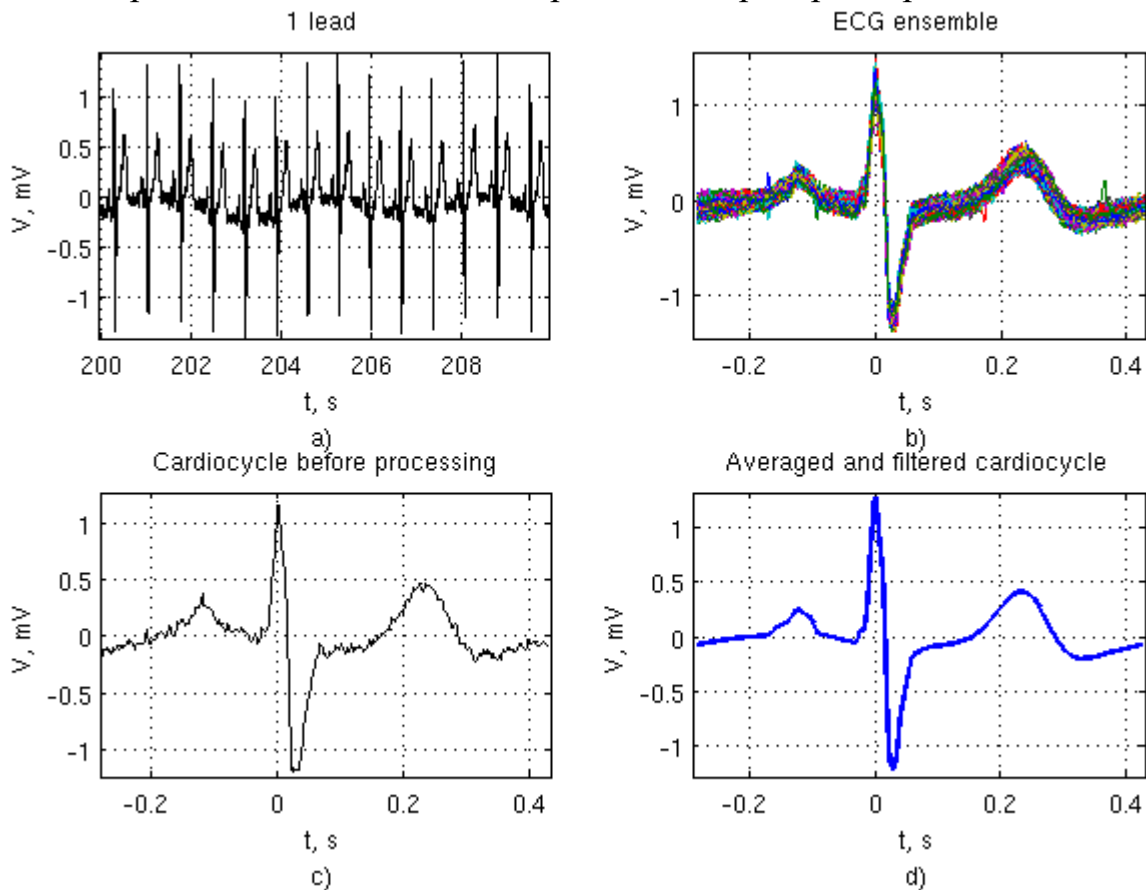


Рис. 1. Этапы обработки ЭКГ ВР сигнала: а) исходный зарегистрированный ЭКГ сигнал первого стандартного отведения, б) ансамбль ЭКГ сигнала из кардиоциклов с синхронизацией по R-зубцу, в) выборочный кардиоцикл без усреднения, г) усреднённый кардиоцикл

Цифровая обработка электрокардиосигнала включает в себя разделение исходного электрокардиосигнала (рис. 1 а) на кардиоциклы с синхронизацией по *R*-зубцу (рис. 1 б), а также фильтрацию и временное усреднение ансамбля кардиоциклов, представленных на рис. 1 в. Фильтрация выполняется для устранения шумов и помех: сетевой наводки с частотой 50 Гц, мышечного тремора с частотой 35 Гц и дрейфа изолинии с частотой до 1 Гц.

Для сравнения, выборочный кардиоцикл (без усреднения) представлен на рис. 1 с. Временное усреднение позволяет значительно снизить соотношение сигнал/шум, так как полезный сигнал периодически повторяется от кардиоцикла к кардиоциклу, а шумовая составляющая во времени хаотична. Следовательно, при усреднении кардиоциклов полезный сигнал сохраняется, а шумовые составляющие частично компенсируют друг друга (рис. 1. d).

Временной анализ

При временном анализе в системах ЭКГ ВР определяются значения низкоамплитудных компонент (поздних потенциалов предсердий или желудочков) на определённом участке усреднённого кардиоцикла (терминальная часть зубца *P* или зубца *S*), которые являются маркерами развития тахикардий сердца.

Однако, такой анализ может быть информативным, если точно знать, на каком участке ЭКГ отражается то или иное нарушение работы сердца. При миокардиодистрофии характер нарушений в сердце может быть как локальным, так и диффузным, поэтому изменения электрокардиограммы неспецифичны и трудно сказать, в какой области сердца и, соответственно, на каком временном интервале электрокардиограммы присутствуют отклонения. В связи с этим, признаки миокардиодистрофии необходимо искать в преобразованных базах.

Вейвлет-анализ

При клинических исследованиях выполнен дискретный вейвлет-анализ усреднённых кардиоциклов ЭКГ сигналов пациентов 2-х групп: «раненные» и «здоровые».

Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развёртку, при этом масштаб и координата рассматриваются как независимые переменные, что позволяет анализировать ЭКГ сигнал сразу в двух пространствах — масштабном и временном [7, 8].

При исследовании сигналов с помощью дискретного вейвлет-анализа выполняется их представление в виде совокупности последовательных приближений грубой (аппроксимирующей) $a_m(t)$ и уточненной (детализирующей) $d_m(t)$ составляющих

$$S(t) = a_m(t) + \sum_{j=1}^m d_j(t)$$

с последующим их уточнением итерационным методом. Каждый шаг уточнения соответствует определенному масштабу a_m (т.е. уровню m) анализа (декомпозиции) и синтеза (реконструкции) сигнала [7, 8].

Численные эксперименты

В работе использованы электрокардиосигналы второго стандартного отведения, зарегистрированные системой ЭКГ ВР с частотой дискретизации 1 кГц. Поскольку во всех отведениях записаны одни и те же сигналы электрической активности сердца, только снятые с разных точек на поверхности организма человека, анализ нескольких отведений лишь поможет уточнить данные, полученные при анализе одного отведения.

Согласно теории вейвлетов, наиболее информативный результат достигается при использовании материнской функции, морфология которой напоминает исследуемую функцию. Для вейвлет-анализа выбрана материнская функция Мейера, которая при разных временных масштабах очень похожа на зубцы и комплексы ЭКГ сигнала, что даёт возможность исследовать изменения отдельных участков ЭКГ на разных уровнях детализации. Разложение проведено до 9-го уровня.

Для численного анализа результатов вейвлет-разложения были найдены интегральные параметры всех девяти аппроксимирующих a_m и детализирующих d_m составляющих согласно формулам

$$I_{a_m} = \sum_{j=1}^n |a_{mj}|,$$

$$I_{d_m} = \sum_{j=1}^n |d_{mj}|.$$

где $m = 1...9$ — уровень разложения, n — количество отсчетов уровня разложения, I_{a_m}, I_{d_m} — интегралы под кривыми a_m и d_m соответственно.

Поскольку при миокардиодистрофии нарушаются процессы, связанные с транспортировкой ионов Ca^{2+} , изменения электрокардиосигналов при вейвлет-разложении будут видны на высших уровнях разложения [8, 9]. Наиболее показательные результаты интегральных параметров аппроксимирующих составляющих a_m и детализирующих составляющих d_m для пациентов из группы «здоровые» и группы «раненные» приведены в табл. 1. и показаны на рис. 2.

Таблица 1

Минимальное, максимальное, среднее значения и диапазон изменений значений интеграла (показателей для 8-го и 9-го уровней детализации и 9-го уровня аппроксимации)

	«Здоровые»				«Раненные»			
	Макс.	Среднее	Мин.	Диапазон	Макс.	Среднее	Мин.	Диапазон
I_{a8}	170,37	83,39	32,94	137,43	30,82	21,02	9,69	21,12
I_{d9}	45,33	18,95	6,65	38,68	6,54	3,19	1,52	5,02
I_{a8}	15,37	9,06	1,79	13,58	3,17	2,16	0,87	2,29

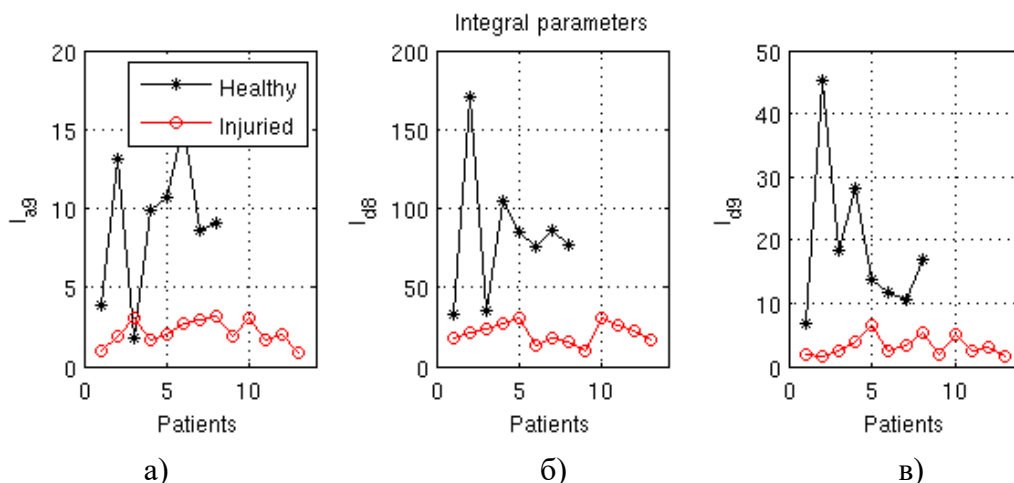


Рис. 2 Значення інтегральних параметрів апроксимуючої складової а) a_9 і деталізуючих складових б) d_8 , в) d_9 для пацієнтів із групи «здорові» і групи «ранені»

Примеры вейвлет-разложения усреднённых кардиоциклов пациентов из обеих групп представлены на рис. 3.

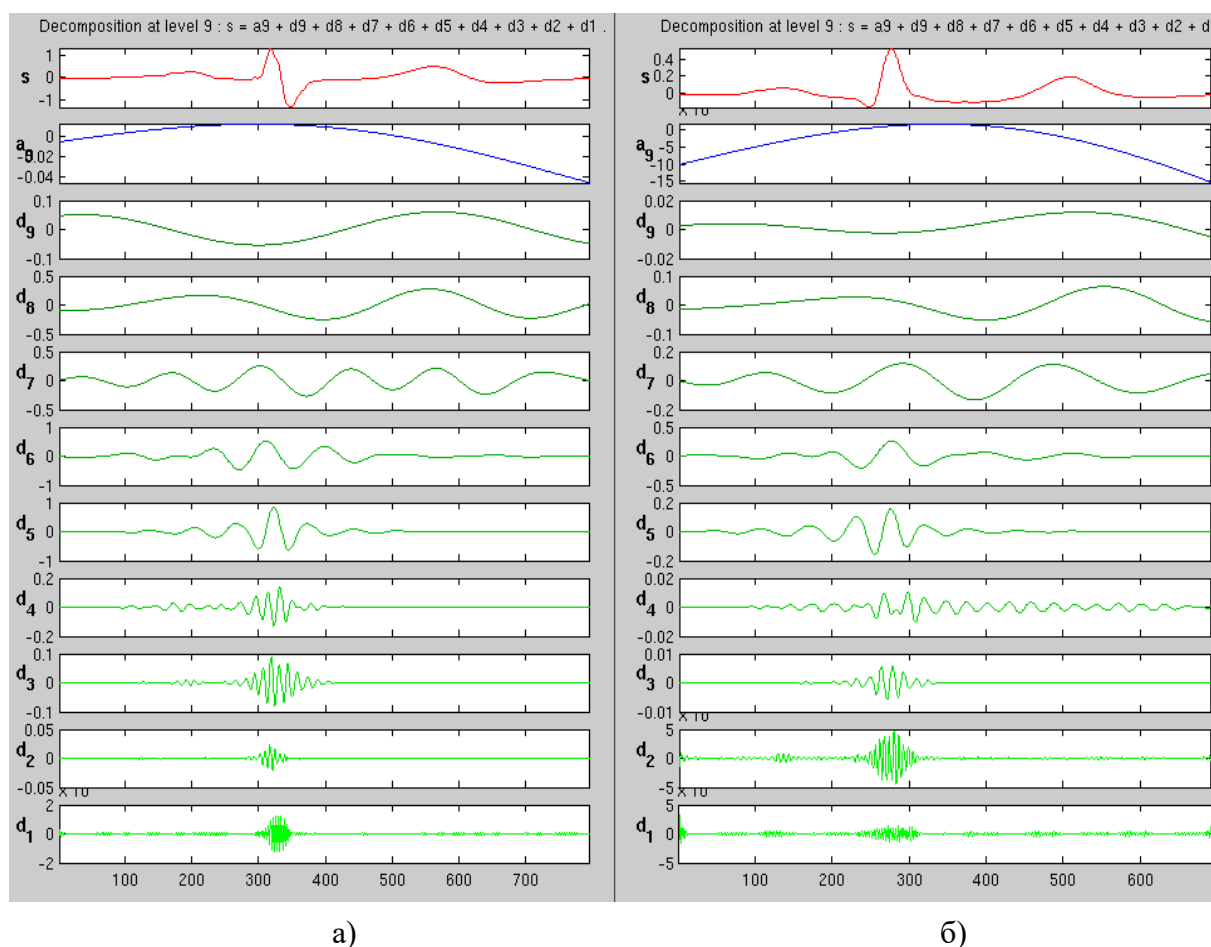


Рис. 3. Вейвлет-разложение усреднённых кардиоциклов пациентов из групп а) «здоровые» и б) «раненные»

Обсуждение результатов

Обычно считают, что миокардиодистрофия на электрокардиограмме влияет на длительность и амплитуду S-, T-зубцов ST-интервала [3]. Метод ЭКГ ВР позволяет регистрировать сигналы электрической активности сердца с высокой разрешающей способностью по времени и амплитуде, а также рассчитать таблицу амплитудно-временных параметров (амплитуды и длительности зубцов и интервалов) для усреднённой ЭКГ каждого отведения. По полученным параметрам определено, что у 38% пациентов снижена амплитуда P-зубца и у 85% - амплитуда S-зубца, у 39% - амплитуда T-зубца, у 54% пациентов значительно увеличена длительность T-зубца. В то же время, амплитуда усреднённого кардиоцикла у «здоровых» пациентов лежит в диапазоне 1,2...2,5 мкВ, а у «раненных» — 0,3...0,8 мкВ. Данные результаты подтверждают тот факт, что при миокардиодистрофии может быть поражена любая область сердца, а электрокардиосигнал, отражающий патологические процессы, не имеет специфических признаков. Таким образом, для диагностики миокардиодистрофии требуется анализ всего кардиоцикла.

В полученных результатах вейвлет-анализа показано различие численных показателей практически на всех уровнях, но наиболее информативные параметры приведены для высоких уровней разложения (табл. 1), которые отражают низкочастотные составляющие электрокардиосигнала. С помощью вейвлет-анализа можно не только детектировать наличие патологии «миокардиодистрофия», но и разработать алгоритм классификации электрокардиосигналов для группы «раненные» по степени тяжести.

Выводы

В работе выполнен вейвлет-анализ усреднённых кардиоциклов для пациентов из группы «здоровые» и группы «раненные». На основе дискретного вейвлет-разложения предложена методика выявления признаков посттравматической миокардиодистрофии. В качестве признаков принимаются числовые параметры, которые определяются как интегральные характеристики для самых высоких уровней вейвлет-разложения усреднённых кардиоциклов.

Перечень ссылок

1. Руководство по кардиологии / под ред. В. Н. Коваленко. – К. : МОРИОН, 2008. – 1424 с.
2. İlhan E. Electrocardiographic features of patients with earthquake related posttraumatic stress disorder / E. İlhan, A. Kaplan, T. S. Güvenç, M. Biteker, E. Karabulut, S. Işıklı // World Journal of Cardiology. – 2013. – Vol. 5, No 3. – pp. 60-64.
3. Исаева А. Д. Миокардиодистрофия. Причины, симптомы, признаки, диагностика и лечение патологии [Электронный ресурс] / А. Д. Исаева. – Режим доступа: <http://www.polismed.com/articles-miokardiodistrofija-prichiny-simptomu-priznaki.html>.
4. Шок: Теория, клиника, организация противошоковой помощи / под общ. ред. Г. С. Мазуркевича, С. Ф. Багненко. – СПб. : Политехника, 2004, – 539 с.

5. Военно-полевая хирургия [Электронный ресурс] / под ред. Е. К. Гуманенко. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. – Режим доступа : <http://www.studmedlib.ru/book/ISBN9785970409114.html>

6. Іванушкіна Н. Г. Цифрова обробка низькоамплітудних компонент електрокардіосигналів / Н. Г. Іванушкіна, К. О. Іванько. – Миколаїв : ФОП Швець В.Д., 2014. – 184с.

7. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н. К. Смоленцев. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 304 с.

8. Haque A. K. Detection of small variations of ECG features using wavelet / A. K. Haque, M. H. Ali, M. A. Kiber, M. T. Hasan // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2009. – Vol. 4, No 6. – pp. 27-30.

9. Ishikawa Y. Wavelet Theory-Based Analysis of High-Frequency, High-Resolution Electrocardiograms: A New Concept for Clinical Uses / Y. Ishikawa // Progress in Biomedical Research. – 2002. – Vol. 7, No 3. – pp. 179-184.

References

1. Kovalenko V. N. ed. (2008) Rukovodstvo po kardiologii [Guidelines for Cardiology]. Kyiv, MORION, 1424 p.

2. İlhan E., Kaplan A., Güvenç T.S., Biteker M., Karabulut E., and Işıklı S. (2013) Electrocardiographic features of patients with earthquake related posttraumatic stress disorder. [World Journal of Cardiology](#), Vol. 5, No 3, pp. 60-64.

3. Isaeva A. D. Myocardiodystrophy. Causes, symptoms, signs, diagnosis and treatment of disease. Available at: <http://www.polismed.com/articles-miokardiodistrofija-prichiny-simptomu-priznaki.html>.

4. Mazurkevicha G. S. eds, Barnenko S. F. (2004) Shok: Teoriya, klinika, orranizatsiya protivoshokovoi pomoshchi [Shock: Theory, clinic, organization antishock aid]. – SPb, Politekhnik, 539 p.

5. Gumanenko E. K. eds. (2008) [Voenno-polevaya khirurgiya](#) [Military Field Surgery]. Moskow, GEOTAR-Media

6. Ivanushkina N. H., and Ivanko K. O. (2014) Tsyfrova obrobka nyzkoamplitudnykh komponent elektrokardiosyhnaliv [Digital processing of low amplitude components of electrocardiosignal]. Mykolaiv, FOP Shvets V.D., 184 p.

7. Smolentsev N. K. (2005) Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB [Fundamentals of wavelet theory. Wavelets in MATLAB]. Moskow, DМК Press, 304 p.

8. Haque A. K., Ali M. H., Kiber M. A., and Hasan M. T. (2009) Detection of small variations of ECG features using wavelet. [ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences](#), Vol. 4, No 6, pp. 27-30.

9. Ishikawa Y. Wavelet Theory-Based Analysis of High-Frequency, High-Resolution Electrocardiograms: A New Concept for Clinical Uses. [Progress in Biomedical Research](#), 2002, vol. 7, № 3, pp. 179-184.

Іванушкіна Н. Г., Іванько Є. О., Чеснокова О. В., Чайковський І. А. Вейвлет-аналіз електрокардіосигналів для виявлення ознак посттравматичної міокардіодистрофії. Розглянуто особливості впливу травматичної хвороби на серцево-судинну систему. Виконано числові експерименти з дослідження електрокардіосигналів військово-службовців після мінно-вибухового поранення. У процесі клінічних досліджень реєстрація та обробка електрокардіосигналів виконані за допомогою системи електрокардіографії високого розрізнення. На основі проведеного вейвлет-аналізу електрокардіосигналів запропоновано інтегральні параметри для виявлення ознак посттравматичної міокардіодистрофії.

Ключові слова: посттравматична міокардіодистрофія, система електрокардіографії високого розрізнення, вейвлет-аналіз електрокардіосигналів, низькоамплітудні компоненти ЕКГ.

Иванушкина Н. Г., Иванько Е. О., Чеснокова О. В., Чайковский И. А. Вейвлет-анализ электрокардиосигналов для выявления признаков посттравматической миокардиодистрофии. Рассмотрены особенности влияния травматической болезни на сердечно-сосудистую систему. Выполнены численные эксперименты по исследованию электрокардиосигналов военнослужащих после минно-взрывных ранений. В процессе клинических исследований регистрация и обработка электрокардиосигналов выполнены с помощью системы электрокардиографии высокого разрешения. На основе проведенного вейвлет-анализа электрокардиосигналов предложены интегральные параметры для выявления признаков посттравматической миокардиодистрофии.

Ключевые слова: посттравматическая миокардиодистрофия, система электрокардиографии высокого разрешения, вейвлет-анализ электрокардиосигналов, низькоамплітудные компоненты ЭКГ.

Ivanushkina N., Ivanko K., Chesnokova O., Chaikovskiy I., Wavelet analysis of the electrocardiograms for detection of the posttraumatic myocardial dystrophy features.

Introduction. The features of the traumatic disease's impact on the cardiovascular system are reviewed. Numerical experiments on electrocardiosignals of the soldiers injured by mine explosion were held. The nature of the posttraumatic myocardial dystrophy is described.

HR ECG signals' analysis. During clinical studies the registration and processing of electrocardiosignals were performed by the high resolution electrocardiography system. The time and amplitude analysis of HR ECG signals was held, and its low efficiency was approved. The integral parameters for detection of the posttraumatic myocardial dystrophy features based on the wavelet analysis of the electrocardiosignals are proposed.

Conclusion. Since the myocardial dystrophy is caused by the violation of the processes related to the transport of ions Ca^{2+} , the changes of electrocardiosignals are visible at the highest levels of wavelet decomposition. Thus, the 8th and 9th levels of the 9-level wavelet decomposition of averaged cardiocycles showed the best result for diagnostic.

Keywords: posttraumatic myocardial dystrophy, high resolution electrocardiography system, wavelet analysis of the electrocardiosignals, low-amplitude components of ECG.