

УДК 004

Н. М. Кравченко¹, Е. Г. Ладария², Т. Д. Ключанова¹, В. В. Бондарчук¹¹ Государственное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк 83048, г. Донецк, ул. Артема, дом 118 б.² ГОУ ВПО «Донецкий национальный медицинский университет им. М. Горького», г. Донецк 83003, г. Донецк, пр. Ильича, 16

РАСПОЗНАВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПО КАРДИОСИГНАЛУ В ПРОЦЕССЕ БАРОТЕРАПИИ

N. M. Kravchenko¹, E. G. Ladaria², T. D. Klyushanova¹, V. V. Bondarchuk¹¹ State Institution «Institute of Problems of Artificial Intelligence», Donetsk 83048, Donetsk, Artema str., 118-b² Donetsk National Medical University named after M. Gorky, c. Donetsk 83003, c. Donetsk, Ilyich av., 16

RECOGNITION OF HEART RATE VARIABILITY PARAMETERS BASED ON A CARDIAC SIGNAL DURING BAROTHERAPY

Н. М. Кравченко¹, Е. Г. Ладарія², Т. Д. Ключанова¹, В. В. Бондарчук¹¹ Державна установа «Інститут проблем штучного інтелекту», м. Донецьк 83048, м. Донецьк, вул. Артема, 118 б² Донецький національний медичний університет ім. М. Горького 83003, м. Донецк, пр. Ілліча, 16

РОЗПІЗНАВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВАРИАбельНОСТІ СЕРЦЕВОГО РИТМУ ЗА КАРДІОСИГНАЛОМ У ПРОЦЕСІ БАРОТЕРАПІЇ

В статье представлен универсальный подход применения анализа и расчета параметров variability сердечного ритма по кардиосигналу в процессе баротерапии. Программная реализация функциональной диагностики осуществлена методами статистического анализа рядов кардиоинтервалов интервалографии, вариационной пульсометрией, спектральным анализом, корреляционной ритмографией.

Ключевые слова: временные ряды, variability сердечного ритма, статистическая обработка.

The article presents a universal approach to the analysis and calculation of heart rate variability parameters by a cardiac signal in the process of barotherapy. The software implementation of functional diagnostics was carried out by the methods of statistical analysis of the series of cardio-intervals: intervalography, variational pulsometry, spectral analysis, and correlation rhythmography.

Keywords: time series, heart rate variability, statistical processing.

У статті представлений універсальний підхід застосування аналізу і розрахунку параметрів variability серцевого ритму за кардіосигналом у процесі баротерапії. Програмна реалізація функціональної діагностики здійснена методами статистичного аналізу рядів кардіоінтервалів: інтервалографії, варіаційної пульсометрії, спектральним аналізом, кореляційної ритмографії.

Ключові слова: тимчасові ряди, variability серцевого ритму, статистична обробка.

Введение

За последние десятилетия были выявлена существенная взаимосвязь между состоянием вегетативной нервной системы (ВНС) и смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний, включая внезапную смерть. Экспериментальные подтверждения связи между предрасположенностью к летальным аритмиям и признаками повышенной симпатической или пониженной вагусной активности стимулировали исследования в области количественных показателей вегетативной активности. Вариабельность сердечного ритма (ВСР) представляет собой один из наиболее многообещающих показателей такого рода.

Преимущество диагностики с помощью анализа variability сердечного ритма состоит в том, что таким образом обнаруживаются малейшие отклонения в деятельности сердца, выявляется развитие заболеваний на самых ранних стадиях, когда они еще не определяются традиционными средствами визуального и количественного анализа. Методы анализа ВСР позволяют оценить общие функциональные возможности организма, способности его адаптации к изменяющимся условиям внешней среды.

Как указано, в частности, в работе [1] одним из приоритетных видов деятельности в ДНР должна стать информатизация. Современный уровень развития вычислительной техники и информационных технологий позволяет автоматизировать процесс анализа ВСР и формирования режимов барокамеры в процессе лечения пациентов.

Цель работы – разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации.

Основное содержание работы

В Институте проблем искусственного интеллекта (г. Донецк) ведется разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации. Данное программное обеспечение предназначено для численной обработки результатов записи сердечной деятельности пациентов, проходивших баротерапию. Данные были зафиксированы с помощью автоматизированного диагностического комплекса «Кардио+» в ходе сеансов лечения методом гипербарической оксигенации в Донецком областном диагностическом центре гипербарической оксигенации.

Данными для анализа ВСР являются одноканальные записи электрокардиограмм (ЭКГ) различной длительности (короткие, от двух до нескольких десятков минут, или более продолжительные, многочасовые, т.н. холтеровский мониторинг). На первоначальном этапе такие записи преобразуются в последовательности кардиоинтервалов, которые затем обрабатываются методами математической статистики. Конечно, эффективный анализ таких данных, особенно в случае больших объемов информации, возможен только при использовании вычислительной техники.

Из сохраненной в базе данных информации (результатах замеров ЭКГ) выделяются последовательности кардиоинтервалов, соответствующие 5-минутным записям по каждому из этапов сеанса лечения: 5 минут до сеанса, период компрессии (подъем давления в камере), изопрессия (при постоянном повышенном давлении), период декомпрессии (снижение давления), 5 минут после сеанса.

Существующие методы анализа ВСР относятся к следующим направлениям: интервалография, вариационная пульсометрия, спектральный анализ, корреляционная ритмография [2].

В интеллектуальную систему поддержки принятия решений включена программная реализация указанных методов для статистического анализа рядов кардиоинтервалов, записанных на каждом из этапов сеанса лечения.

По данным измерений величин кардиоинтервалов, соответствующих одному этапу, строится интервалограмма (ритмограмма), предназначенная для визуального анализа изменения последовательных интервалов (рис. 1).

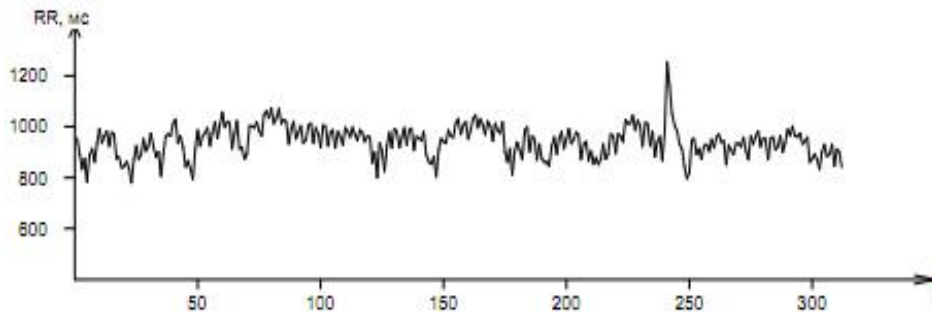


Рисунок 1 – Интервалограмма. По оси X – последовательные номера интервалов, по Y – длительность интервала в миллисекундах

При этом происходит минимизация уровня артефактов в исходном ряду. Специальная подпрограмма производит распознавание артефактов. Если их не слишком много, не более 10 процентов от общего количества интервалов, дальнейший расчет возможен, но артефакты в этом случае удаляются из ряда или заменяются интерполяцией по соседним точкам (рис. 2). То есть непригодный для обработки сигнала участок ритмограммы не принимается во внимание при дальнейшей оценке данных.

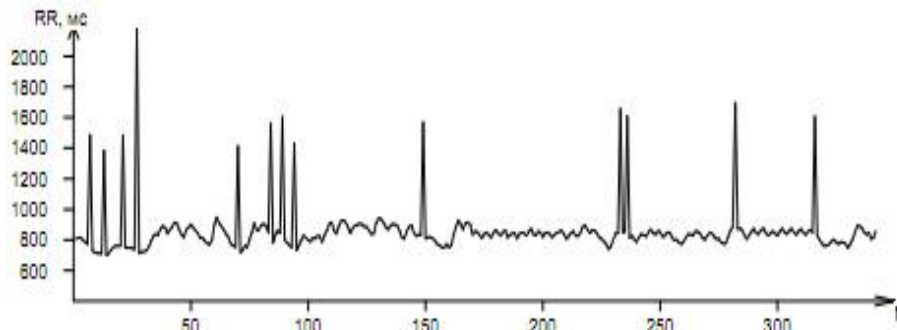


Рисунок 2 (а) – Исходная интервалограмма

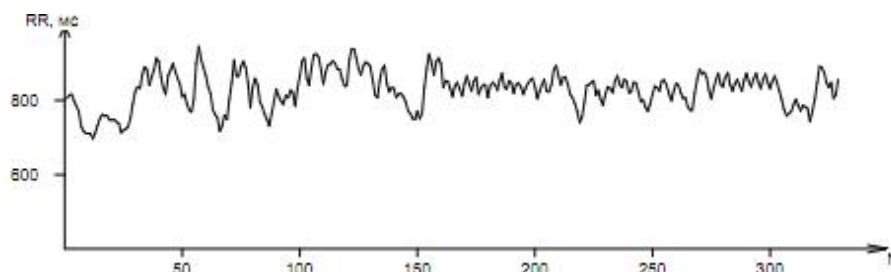


Рисунок 2 (б) – После исключения артефактов

Таким образом, при наличии аритмии единичные экстрасистолы и пропуски сердечных сокращений исключаются из анализа данных, при аритмии постоянного характера выводится сообщение о непригодности сигнала к обработке.

В методе вариационной пульсометрии оценивается распределение кардиоинтервалов путем построения и визуального анализа гистограммы (рис. 3).

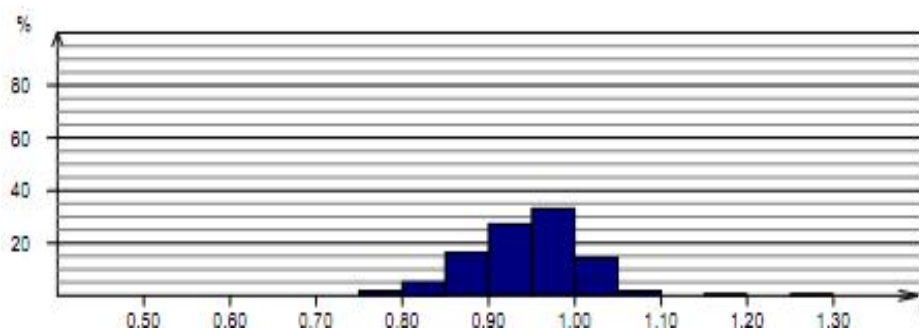


Рисунок 3 – Диаграмма распределения кардиоинтервалов по длительностям

Горизонтальная шкала длительностей интервалов при этом разбивается на последовательные участки равной длины, международными стандартами принято разбиение на диапазоны по 50 мс. На построенной гистограмме высота каждого столбика соответствует проценту присутствующих в рассматриваемой записи ЭКГ кардиоинтервалов, попадающих в определенный диапазон длительности. Нормальной сердечной деятельности соответствует симметричная, куполообразная и цельная гистограмма. Несимметричная гистограмма характеризует аритмичный характер сердечных сокращений.

Кроме графического представления, в вариационной пульсометрии определяется ряд количественных показателей, таких, как вариационный размах – разность между максимальным и минимальным интервалами, среднее значение (математическое ожидание), стандартное отклонение SDNN, мода и амплитуда моды и др. Для этих показателей по результатам большого числа наблюдений определены вариационной пульсометрии определяется ряд количественных показателей, таких, как вариационный размах – разность между максимальным и минимальным интервалами, среднее значение (математическое ожидание), стандартное отклонение SDNN, мода и амплитуда моды, границы нормы в зависимости от пола и возраста пациента [3].

При спектральном анализе исходная последовательность сердечных сокращений преобразуется в спектр мощности колебаний длительности кардиоинтервалов. Полученный спектр представляет собой последовательность частот, каждой из которых соответствует определенная амплитуда колебаний.

В интеллектуальной системе поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации реализовано определение спектральных характеристик последовательностей RR-интервалов с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot [\cos(2\pi kn/N) - i \cdot \sin(2\pi kx_n n/N)]$$

где N – количество значений величины, измеренной за рассматриваемый период T , x_n – измеренные значения величины (в дискретных временных точках с номерами $n = 0, \dots, N - 1$), X_k – комплексные амплитуды гармоник, слагающих исходный ряд, $\frac{|X_k|}{N}$ – вещественная амплитуда k -го сигнала, k – индекс частоты, частота k -го сигнала $\frac{k}{T}$.

Но для применения ДПФ исходная интервалограмма предварительно преобразуется к временному ряду с фиксированным временным шагом. Для этого выполняются следующие действия: по оси X откладывается время, прошедшее с

начала этапа, а по Y – длительность соответствующего интервала. Через полученные точки проводится интерполяционная кривая (кубические сплайны). Далее ось времени (участок, соответствующий длительности этапа) разбивается на равные отрезки, и в точках разбиения рассчитываются значения интерполирующей функции. Над полученным временным рядом теперь уже с постоянным шагом проводится дискретное преобразование Фурье. Анализ мощности колебаний длительности RR-интервалов, полученных при обработке 5-минутных записей ЭКГ (рис. 4), проводится в следующих диапазонах частот:

HF – высокие частоты, 0,4–0,15 Гц; дыхательные волны; мощность в этом диапазоне частот отражает парасимпатическую активность;

LF – низкие частоты, 0,15–0,04 Гц; характерен для активности симпатической нервной системы;

VLF – очень низкие частоты, менее 0,04 Гц.

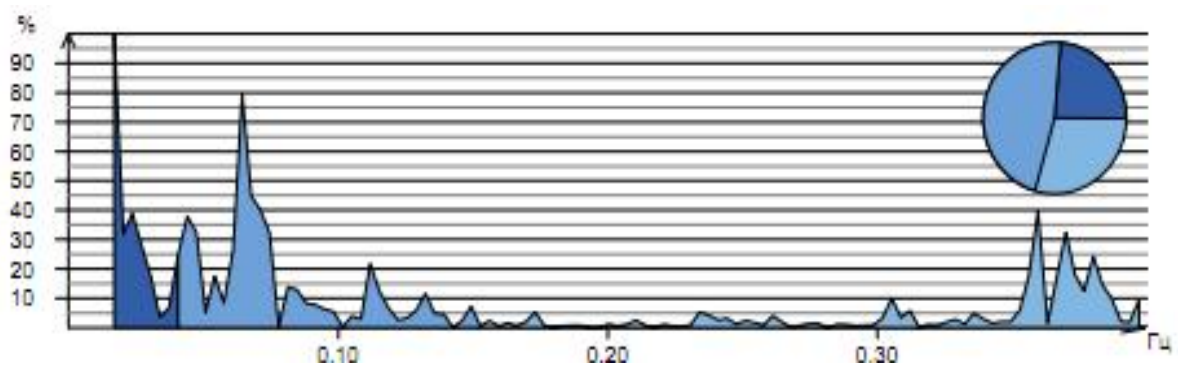


Рисунок 4 – Результаты расчета спектра мощности (в нормированном виде).

В интеллектуальной системе поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации реализована функция построения двумерных диаграмм рассеяния (метод корреляционной ритмографии), представляющих соотношение между длительностями предшествующего и последующего кардиоинтервалов (рис. 5).

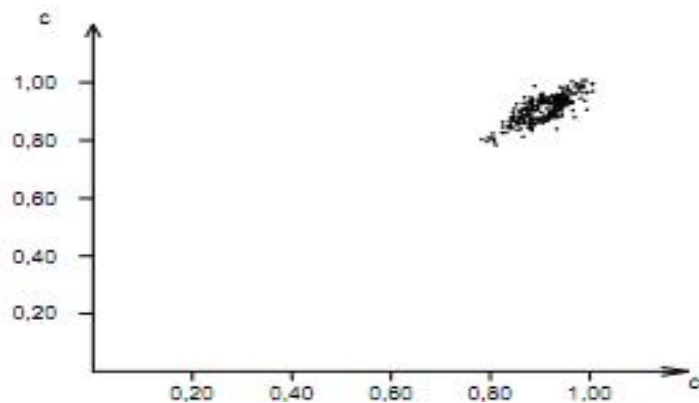


Рисунок 5 – Построение диаграммы рассеяния (скаттерограммы)

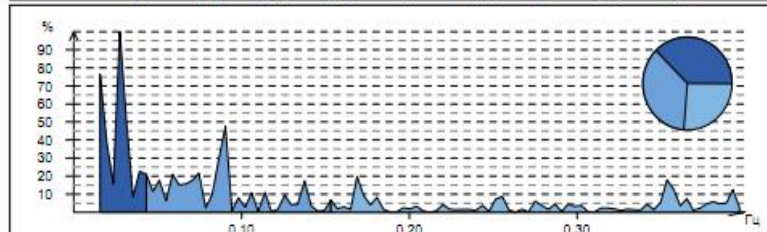
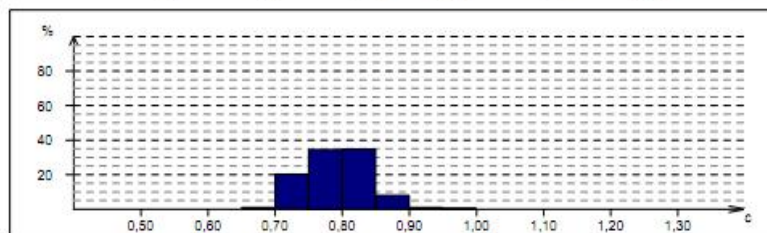
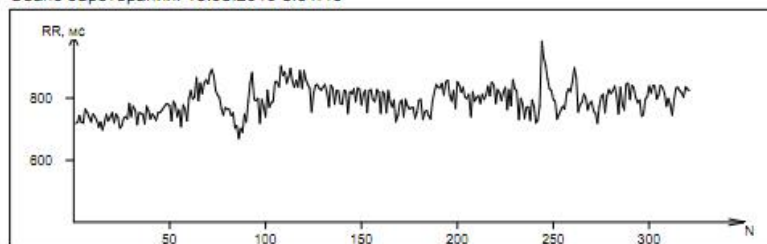
В интеллектуальной системе поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации реализована возможность автоматической подготовки отчета о показателях сердечной деятельности пациента на различных этапах сеанса баротерапии. По желанию пользователя, отчет может быть выведен на печать или сохранен в PDF-формате (рис. 6).

Пациент: Петров Валерий Павлович, 59 лет
Сеанс баротерапии: 18.08.2010 8:51:46

Пол: М

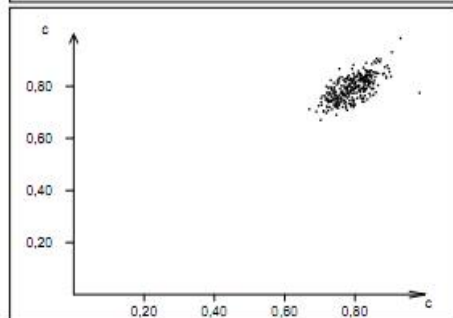
Рост: 180

Вес: 90



Система регуляции сердечного ритма

А. Суммарный эффект регуляции: (1) Умеренная тахикардия
 Б. Функция автоматизма: (0) Умеренная синусовая аритмия
 В. Вегетативный гомеостаз: (0) Вегетативный гомеостаз сохранен



| Временные показатели ВСР | | |
|-----------------------------|----------|---------------|
| Mean, мс | 793 | 832 - 1017 |
| HR, уд./мин. | 76 | 60 - 90 |
| SDNN, мс | 47 | 30 - 100 |
| RMSSD, мс | 39 | 20 - 55,3 |
| SDSD, мс | 24 | |
| pNN50, % | 20,3 | 4,5 - 31,9 |
| CV, % | 5,9 | 3 - 12 |
| As | 0,2 | |
| Ex | 0,1 | |
| Показатели Баевского | | |
| Mo, с | 0,8 | 0,7 - 1,1 |
| AMo, % | 34,9 | 30 - 50 |
| X, с | 0,31 | 0,15 - 0,45 |
| ИВР, %/с | 111,1 | 35 - 145 |
| ВПР, 1/с2 | 4,0 | 3,53 - 7,73 |
| ПАПР, %/с | 43,6 | 15 - 50 |
| ИН, %/с2 | 69,4 | 50 - 150 |
| Спектральные характеристики | | |
| TP, мс2 | 1044 | 2350 - 4550 |
| VLF, мс2 | 392 | 765 - 1400 |
| | 37% | 17,41 - 39,89 |
| LF, мс2 | 378 | 754 - 1586 |
| | 36% | 24,64 - 42,72 |
| HF, мс2 | 276 | 772 - 1178 |
| | 26% | 21,05 - 50,58 |
| LFnorm, % | 57,8 | 50 - 58 |
| | 57,8 | 41,2 - 60,0 |
| HFnorm, % | 42,2 | 26 - 33 |
| | 42,2 | 40,0 - 58,8 |
| LF/HF | 1,4 | 1,5 - 2,0 |
| | 1,4 | 0 - 2,2 |
| IC=(HF+LF)/VLF | 1,7 | |
| Индексы Каплана | | |
| IDM, % | 2,459 | |
| CAT, % | 1418,900 | |
| ИМА, % | 49,265 | |

Рисунок 6 – Результаты расчета показателей ВСР

В системе предусмотрены возможности быстрого поиска пациента в базе данных, выделения групп пациентов по различным признакам и составления статистических сводок по результатам проведенных обследований с сохранением их в формате Microsoft Excel (рис. 7).

| № | Дата сеанса | ФИО | Год рожд. | Статистический анализ | | | | | | | | | | | | | | СТАГ | | | | | |
|---|-------------|------------------------------|-----------|-----------------------|-------------|----------|-----------|----------|-------|------|------|-------|----------|--------|--------|--------|---------|---------|--------------|----------------------------|------|-----------------------|-----|
| | | | | Mean, мс | HR, уд./мин | SDNN, мс | RMSSD, мс | rMSSD, % | CV, % | As | Ex | X, мс | Mzda, мс | Amo, % | INP, % | ВТР, % | TAQT, % | TAQT, % | HRV, ТМН, мс | Суммарный эффект регуляции | | | |
| 1 | 18.08.2010 | Гетров Валерий Павлович | 1961 | 793 | 78 | 47 | 36 | 24 | 20,3 | 5,9 | 0,2 | 0,1 | 314 | 800 | 54,9 | 1,11 | 4,0 | 43,6 | 65,4 | 14,0 | 27,6 | Умеренная тахикардия | 1 |
| 2 | 18.08.2010 | Набережнин Владимир Иванович | 1900 | 776 | 77 | 75 | 31 | 20 | 6,3 | 9,7 | 1,6 | 4,3 | 616 | 760 | 39,2 | 74,0 | 2,6 | 50,9 | 49,3 | 11,1 | 22,2 | Умеренная тахикардия | 1 |
| 3 | 30.08.2010 | Богд Матвеев Леонид | 1938 | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** | *** |
| 4 | 30.08.2010 | Сурый Александр Яковлевич | 1952 | 716 | 78 | 31 | 15 | 9 | 0,0 | 4,0 | 0,3 | 0,4 | 179 | 760 | 55,8 | 3,17 | 7,4 | 74,4 | 107,8 | 7,5 | 15,0 | Умеренная тахикардия | 1 |
| 5 | 06.08.2019 | Фурски Алина Федоровна | 1988 | 635 | 84 | 78 | 63 | 59 | 5,5 | 12,0 | -0,8 | 5,2 | 620 | 690 | 31,3 | 50,4 | 2,5 | 46,1 | 38,8 | 12,0 | 23,6 | Выраженная тахикардия | 2 |

Рисунок 7 – Показатели ВСР во время сеансов лечения пациентов выбранной группы

Выводы

Возможность обработки записей сигнала ЭКГ и экспорта результатов анализа ритмограмм в табличные процессоры типа Microsoft Excel позволит на серьезном уровне выполнять исследования влияния проводимого лечения на состояние сердечно-сосудистой системы пациента, выявлять корреляцию различных показателей variability между собой, устанавливать их связь с признаками заболевания и диагнозом пациента.

Список литературы

1. Румянцев В. В. К вопросу об иерархии интеллектуальных систем [Текст] / В.В.Румянцев [Текст] / В. В. Румянцев // Международный рецензируемый научно-теоретический журнал «Проблемы искусственного интеллекта». – 2018. – № 1. – С. 24–31.
2. Кулаичев А. П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика: учебное пособие [Текст] / Кулаичев А. П. – М: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007.
3. Руководство по кардиологии / Variabel'nost' serdechnogo ritma: fiziologicheskie mehanizmy, metody issledovaniya, klinicheskoe i prognosticheskoe znachenie: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://compendium.com.ua/clinical-guidelines/cardiology/section-5/glava-4-variabelnost-serdechnogo-ritma-fiziologicheskie-mehanizmy-metody-issledovaniya-klinicheskoe-i-prognosticheskoe-znachenie/>.

References

1. Rumyantsev V. V. K voprosu ob iyerarkhii intellektual'nykh sistem [On the question of the hierarchy of intelligent systems. *Mezhdunarodnyy retsenziruyemyy nauchno-teoreticheskiy zhurnal «Problemy iskusstvennogo intellekta»* [International peer-reviewed scientific and theoretical journal "Problems of Artificial Intelligence"], 2018, No. 1, S. 24–31.
2. Kulaichev A. P. *Komp'yuternaya elektrofiziologiya i funktsional'naya diagnostika: uchebnoye posobiye* [Computer electrophysiology and functional diagnostics: textbook], M, FORUM: INFRA-M, 2007.
3. *Rukovodstvo po kardiologii / Variabel'nost' serdechnogo ritma: fiziologicheskie mehanizmy, metody issledovaniya, klinicheskoye i prognosticheskoye znachenie*: [Guidelines for cardiology / Heart rate variability: physiological mechanisms, research methods, clinical and prognostic value]. – Rezhim dostupa: <https://compendium.com.ua/clinical-guidelines/cardiology/section-5/glava-4-variabelnost-serdechnogo-ritma-fiziologicheskie-mehanizmy-metody-issledovaniya-klinicheskoe-i-prognosticheskoe-znachenie/>.

RESUME

N. M. Kravchenko, E. G. Ladaria, T. D. Klyushanova, V. V. Bondarchuk
Recognition of Heart Rate Variability Parameters Based
on a Cardiac Signal During Barotherapy

Analysis of heart rate variability is a promising area of modern medicine. Diagnostics of this kind allows you to identify the development of the disease in the early stages. In addition, it is advisable to monitor the patient's heart rate variability during barotherapy. Changes in the indicators of the heart allows us to conclude about the effectiveness of treatment and, if necessary, correct the mode of operation of the pressure chamber. HRV analysis requires processing large amounts of information and using computer technology.

The article describes the software implementation of statistical processing of series of cardiointervals in barotherapy patients. Cardiac recordings were performed during treatment sessions at the Donetsk Center for Hyperbaric Oxygenation. To analyze the variability, the existing methods of HRV analysis were used: intervalography, variational pulsometry, spectral analysis, correlation rhythmography.

This software is included in the decision support system for the formation of hyperbaric oxygenation modes.

The use of statistical analysis of HRV will allow the doctor to assess the effect of the treatment on the state of the patient's cardiovascular system and, if necessary, change the pressure chamber mode. The use of this software system can also be useful in conducting scientific medical research.

РЕЗЮМЕ

Н. М. Кравченко, Е. Г. Ладария, Т. Д. Ключанова, В. В. Бондарчук
Распознавание параметров variability сердечного ритма
по кардиосигналу в процессе баротерапии

Перспективным направлением современной медицины является анализ variability сердечного ритма. Диагностика такого рода позволяет выявить развитие заболевания на ранних стадиях. Кроме того, целесообразно наблюдение за variability ритма сердца пациента в процессе баротерапии. Изменение показателей работы сердца позволяет сделать вывод об эффективности лечения и при необходимости подкорректировать режим работы барокамеры. Анализ ВСР требует обработки больших объемов информации и использования компьютерной техники.

В статье описана программная реализация статистической обработки рядов кардиоинтервалов у пациентов баротерапии. Записи кардиосигнала проводились во время сеансов лечения в Донецком центре гипербарической оксигенации. Для анализа variability использовались существующие методы анализа ВСР: интервалография, вариационная пульсометрия, спектральный анализ, корреляционная ритмография.

Данное программное обеспечение включено в состав системы поддержки принятия решений для формирования режимов гипербарической оксигенации.

Применение статистического анализа ВСР позволит врачу оценивать влияние проводимого лечения на состояние сердечно-сосудистой системы больного и, при необходимости, изменять режим барокамеры. Использование данной программной системы может быть полезным также в проведении научных медицинских исследований.

Статья поступила в редакцию 12.03.2020.