

В. А. Машин
Зависимость показателей variability
сердечного ритма от средней величины R-R интервалов.

Нововоронежский Учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС, г. Нововоронеж

Резюме.

Средствами спектрального анализа исследована связь показателей variability сердечного ритма (Heart Rate Variability - HRV) со средней величиной RR-интервалов между нормальными кардиоциклами (RR_{cp} , сек) при контролируемой частоте дыхания (ЧД) у здоровых обследуемых. Согласно полученным результатам, зависимость частоты пиков на графике спектральной плотности для исходного ряда RR-интервалов от величины RR_{cp} можно представить следующей формулой: $f_{п1.0} = f_{п} : RR_{cp}$, где $f_{п1.0}$ - частота пика при $RR_{cp} = 1.0$ сек, $f_{п}$ - частота пика при текущей RR_{cp} . Для коррекции (нормирования) границ частотных диапазонов спектральной мощности (f_d) исходного ряда RR-интервалов относительно текущей RR_{cp} можно воспользоваться формулой: $f_d = f_{d1.0} \times RR_{cp}$, где $f_{d1.0}$ - граница частотного диапазона при $RR_{cp} = 1.0$ сек. Коррекция (нормирование) границ частотных диапазонов спектральной мощности (f_d), частотных пиков ($f_{п1.0}$) исходного ряда RR-интервалов относительно текущей RR_{cp} позволяет сравнивать различные ряды кардиоинтервалов без использования преобразования к эквидистантному ряду.

Ключевые слова: variability сердечного ритма, спектральный анализ, контролируемое дыхание, коррекция спектральных частот, исходный и дискретный временной ряд.

Mashin V.A.

Dependency of characteristics of heart rate variability
on the average value of the R-R-intervals.

Ross Fiziol Zh Im I M Sechenova. 2002 Jul;88(7):851-5. Russian.

Вісник Харківського Національного Університету ім. В.Н. Каразіна,
Серія "Медицина", Випуск 3, № 545, 2002, с. 40-44. Russian.

Novovoronezh Nuclear Power Station Personnel Training Center,
Novovoronezh, Voronezh oblast, 396072, Russia

Summary

By the means of spectral analysis, dependency of heart rate variability (HRV) on average R-R-intervals (R-Rav, sec) is explored at controlled (forced) breathing. According to our findings, the dependency of the peak frequency at a spectral density graph for source series of R-R-intervals upon the R-Rav may be presented by the following formula: $f_{p1.0} = f_p : R-Rav$, where $f_{p1.0}$ - peak frequency when R-Rav = 1.0 sec, f_p - peak frequency at current R-Rav. For correcting (standardization) the frequency domain borders of spectral power (f_d) of sources series of the R-Rav-intervals it is possible to use the formula: $f_d = f_{d1.0} \times R-Rav$, where $f_{d1.0}$ - frequency domain border at R-Rav = 1.0 sec. The correction (standardization) of frequency domain borders of spectral power (f_d), frequency peaks ($f_{p1.0}$) of sources series of the R-Rav-intervals as compared to current R-Rav allows to compare different series of the R-Rav-intervals without using the transformation to the discrete event series (DES).

Key words: heart rate variability, spectral analysis, controlled breathing, correction of spectral frequency, source and discrete event series

Изучение влияния частоты дыхания (ЧД) на колебания RR-интервалов сердечных сокращений привело к пониманию важности контроля ЧД в ходе регистрации и анализа variability ритма сердца (Heart Rate Variability - HRV) [1, 2, 3, 4, 5]. Исследования показали, что при ЧД меньше 0.17 Гц (10 дыхательных циклов в минуту и менее) наблюдается выраженное повышение дыхательного пика на графике спектральной плотности в высокочастотном диапазоне (High Frequency – HF), а при ЧД свыше 0.25 Гц (15 дыхательных циклов в минуту и более) – его снижение [6]. В клиническую практику был введен тест по измерению HRV во время "принудительного" (forced) ритма дыхания для диагностики функций парасимпатической нервной системы [7, 8].

В своем исследовании мы поставили задачу проанализировать динамику изменения частоты дыхательного пика (f_d) на графике спектральной плотности сердечных сокращений от средней величины RR-интервалов между нормальными кардиоциклами (RR_{cp}). Для основного эксперимента мы выбрали контролируемую ЧД равную 0.1 Гц (6 циклов в минуту - тест на брадикапноэ). Для того чтобы проба на брадикапноэ не была связана с гипервентиляцией, с усилением воли, повышением активности симпатической нервной системы [9, 10], были отобраны испытуемые, которые регулярно занимались бегом или плаванием и у которых ЧД в покое была меньше 0.12 Гц (менее 7 дыхательных циклов в минуту).

МЕТОДИКА.

В исследовании приняли участие 16 здоровых мужчин (средний возраст = 39.5 лет, стандартное отклонение = 4.7), которые уже длительное время регулярно занимались бегом или плаванием. У всех в покое диагностировалась выраженная дыхательная синусовая аритмия ($RR_{cp} = 0.860$, $SD = 0.072$ сек). ЧД в покое колебалась от 0.067 до 0.100 Гц (4 – 6 дыхательных циклов в минуту). Пробы на контролируемое дыхание с частотой 0.1 Гц выполнялись с 8 до 10 часов утра в положении сидя. Данная ЧД не вызвала затруднений у наших испытуемых при выполнении тестовых проб. Длительность ЧД контролировалась с помощью электронного секундомера. Для регистрации ЭКГ и выделения RR-интервалов между последовательными комплексами QRS

(частота дискретизации 500 Гц) использовался 3-х канальный программно-аппаратурный комплекс "RITMON-1". Выражающие длительность сердечных сокращений RR-интервалы (в миллисекундах) сохранялись в ASCII-кодах для дальнейшего компьютерного анализа, построения графика и расчета показателей спектральной плотности с помощью специально разработанной в лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра программы. Длительность регистрации составляла 5 минут. Исходные массивы RR-интервалов были предварительно визуально отредактированы от артефактов и подготовлены для последующего анализа.

Обработка отредактированных данных производилась скользящей выборкой объемом 256 и шагом 10 RR-интервалов. RR_{cp} и показатели спектрального анализа подсчитывались для каждой скользящей выборки. Для расчета показателей спектрального анализа был использован алгоритм быстрого преобразования Фурье со спектральным окном Хэмминга. Стационарность полученных выборок определялась с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена для среднего и дисперсии в отдельности [11]. После редактирования исходных данных и проверки на стационарность для дальнейшего анализа было отобрано 208 выборок объемом 256 RR-интервалов. Расчет и удаление тренда для спектрального анализа проводился с помощью метода наименьших квадратов. Статистический анализ был выполнен с использованием пакета программ Statistica for Windows (версия 5.1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Согласно полученным результатам, для всех обследуемых был зафиксирован выраженный дыхательный пик на графике спектральной плотности сердечных сокращений. Характерно, что расположение этого пика по оси частот было связано с величиной RR_{cp} (рис.1). Чем меньше средняя величина RR-интервалов относительно 1.0 сек, тем меньше частота дыхательного пика на графике спектральной плотности сердечного ритма от ожидаемой ЧД (0.1 Гц). Если RR_{cp} больше 1.0 сек, то частота дыхательного пика на графике спектральной плотности превышает

контролируемую ЧД. При RR_{cp} равной 1.0 сек наблюдается совпадение контролируемой ЧД и частоты дыхательного пика на графике спектральной плотности.

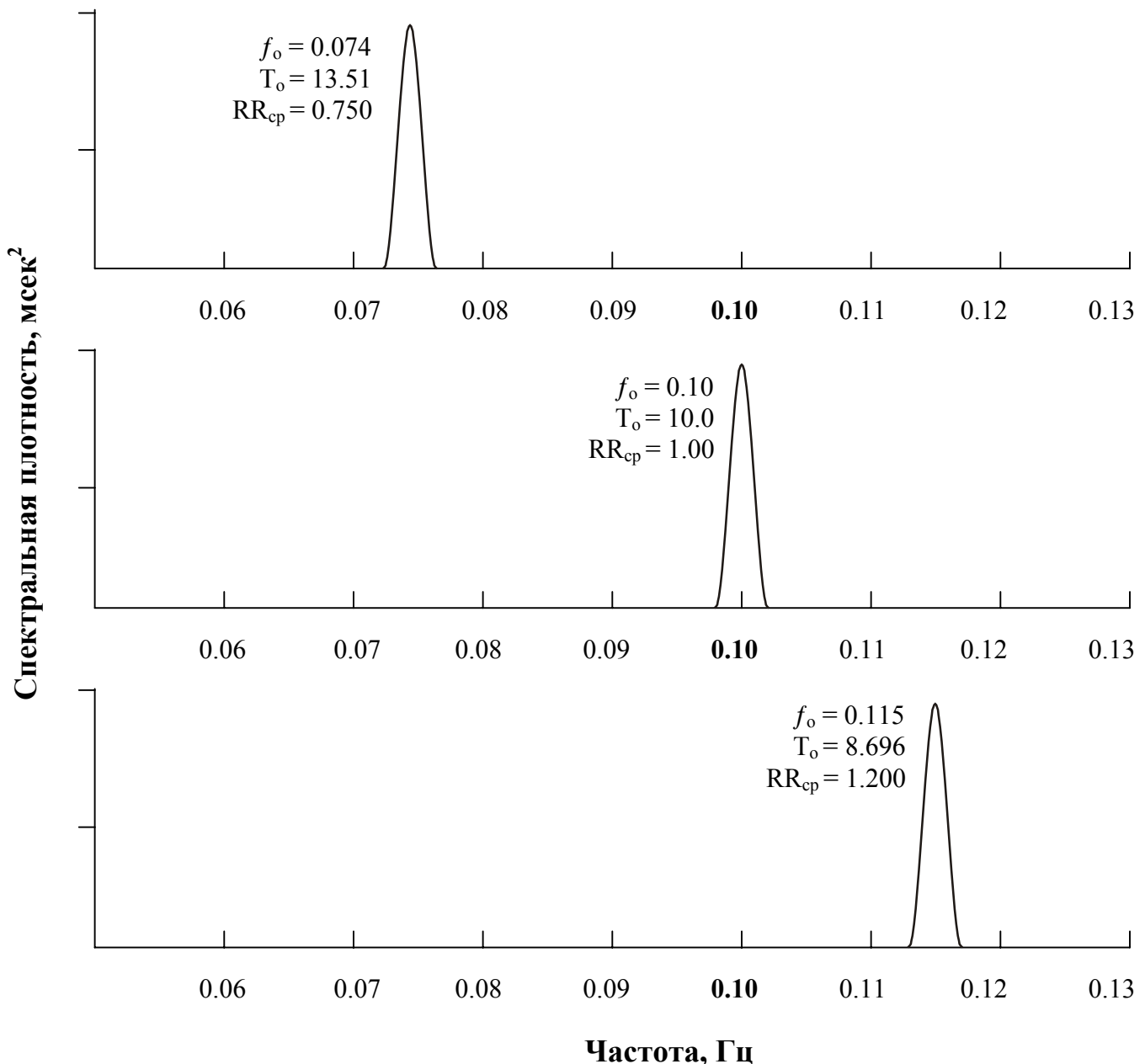


Рисунок 1. Изменение частоты дыхательного пика (f_o , Гц) на графике спектральной плотности сердечных сокращений в условиях контролируемой ЧД (0.1 Гц) при различной RR_{cp} (сек). T_o – период дыхательного пика (сек).

С помощью линейного регрессионного анализа была рассчитана зависимость (объясняющая 98.84% дисперсии, $R=0.9942$, $p=0.000$) частоты дыхательного пика (f_d) от RR_{cp} (сек) при контролируемом дыхании с частотой 0.1 Гц:

$$f_d = A + B \times RR_{cp}, \quad \text{где } A = -0.002071 \text{ (} p < 0.017 \text{)}, \quad B = 0.102542 \text{ (} p = 0.000 \text{)} \quad \{1\}$$

Из формулы {1} следует, что частота f_d зависит, главным образом, от величины коэффициента B , который очень близок по значению к контролируемой ЧД. Если учесть погрешность расчета частоты дыхательного пика по графику спектральной плотности, плюс погрешность контроля за ЧД, то данную формулу можно переписать следующим образом:

$$f_d = \text{ЧД} \times \text{RR}_{\text{ср}} \quad \{2\}$$

Использование в регрессионном анализе (формула {1}) коэффициента $B=0.1$ (ЧД = 0.1 Гц) незначительно изменяет результаты. Полученная в этом случае зависимость объясняет 98.79% дисперсии, $R=0.9939$, $p=0.000$. При этом значение свободного члена становится крайне мало ($A=0.000116$) и им можно пренебречь. Коэффициент корреляции между выборками расчетных (формула {2}) и исходных значений частоты дыхательного пика на графике спектральной плотности равен 0.9942 ($p=0.000$).

Зная исходную частоту дыхательного пика на графике спектральной плотности, по формуле {2} легко рассчитать частоту дыханий, которую контролировал обследуемый:

$$\text{ЧД} = f_d : \text{RR}_{\text{ср}} \quad \{3\}$$

Проверка гипотезы о различии средних по выборкам расчетной частоты дыханий (по формула {3} средняя величина ЧД составила 0.100064 Гц) с заданной в контролируемой пробе (ЧД = 0.1 Гц), показала статистическую незначимость различий между ними (использовался t -тест для зависимых переменных: $t = 1.063$, $p = 0.289$).

В реальности ЧД может изменяться в очень широком диапазоне. На следующем этапе мы решили проверить полученную закономерность для других значений ЧД. С той же группой испытуемых были проведены дополнительные пробы на контролируемое дыхание с частотой 0.200, 0.167, 0.083 и 0.067 Гц (соответственно, 12, 10, 5 и 4 дыхательных цикла в минуту). При этом $\text{RR}_{\text{ср}}$ варьировалась в диапазоне 0.75-1.00 сек. Наблюдаемые на графике спектральной плотности значения частоты дыхательных пиков сравнивались с рассчитанными по формуле {2}. В статистическом анализе использовались значения, полученные в результате спектрального анализа 298 стационарных выборок объемом 256 RR-интервалов. Коэффициент корреляции

между этими выборками равен 0.9973 ($p=0.000$). Проверка гипотезы о равенстве средней разницы между расчетными (формула {3}) и исходными значениями контролируемой частоты дыхания нулю показала статистическую незначимость различий (t-тест для зависимых переменных: $t = -1.131$, $p = 0.259$). Таким образом, выражаемая формулой {2} зависимость позволяет достаточно точно рассчитывать по RR_{cp} наблюдаемые на графике спектральной плотности значения частоты дыхательного пика для любой контролируемой ЧД.

В своем анализе мы использовали исходные ряды RR-интервалов для расчета спектральных показателей. На практике, чтобы выполнить одно из свойств временного ряда: равные промежутки времени между измерениями переменной, используют преобразование динамического ряда кардиоинтервалов в эквидистантный ряд с выбранной частотой квантования [12]. На следующем шаге мы решили сравнить частоты пиков на графике спектральной плотности для эквидистантного ряда RR-интервалов (частота квантования 250 мсек, линейная интерполяция значений) и для исходного динамического ряда. Для этого мы воспользовались результатами 69 проб на контролируемое дыхание с ЧД=0.1 Гц (средний возраст обследуемых составил 25.62 лет, $SD = 2.247$; $RR_{cp}=0.780$ сек, $SD=0.1077$). Частота дыхательного пика на графике спектральной плотности для эквидистантного ряда RR-интервалов совпадала с контролируемой частотой дыхания. Для расчета контролируемой частоты дыхания по дыхательному пику на графике спектральной плотности для исходного ряда RR-интервалов (без преобразований) мы воспользовались формулой {3}. Проверка гипотезы о различии средних по выборкам расчетной контролируемой частоты дыханий для исходного ряда (средняя величина ЧД составила 0.100797 Гц) с контролируемой частотой дыханий для эквидистантного ряда (средняя ЧД = 0.100769 Гц), показала статистическую незначимость различий между ними (использовался t-тест для зависимых переменных: $t = 0.097$, $p = 0.923$). Таким образом, частота пиков на графике спектральной плотности для эквидистантного ряда RR-интервалов совпадает с скорректированной по RR_{cp} частотой пиков на графике спектральной плотности для исходного ряда.

Полученные результаты позволяют нам оценить распределение мощности спектра колебаний сердечных сокращений по частотным диапазонам без использования эквидистантного ряда RR-интервалов. В этом случае формула {2} приобретает следующий вид:

$$f_d = f_{d1.0} \times RR_{cp}, \quad \{4\}$$

где $f_{d1.0}$ - частота спектрального диапазона при RR_{cp} равной 1.0 сек,

f_d - частота спектрального диапазона при текущей RR_{cp} .

Формула {4} позволяет скорректировать (нормировать) границы частотных диапазонов спектральной мощности сердечных сокращений относительно текущей RR_{cp} и решить задачу сравнения различных временных рядов без преобразование их в эквидистантный ряд. Следуя формуле {4}, чтобы скорректировать частотные границы диапазонов спектральной мощности, нам необходимо их значения умножить на текущую RR_{cp} . Согласно [12] частотные диапазоны имеют следующие границы:

VLF - мощность в очень низкочастотном диапазоне: 0.00-0.04 Гц;

LF - мощность в низкочастотном диапазоне: 0.04-0.15 Гц;

HF - мощность в высокочастотном диапазоне: 0.15-0.40 Гц.

Как можно заметить (табл.1), при RR_{cp} меньше 1.0 сек границы диапазонов спектральной мощности сдвигаются влево, а когда RR_{cp} больше 1.0 сек – вправо.

RR_{cp} (сек)	f_{VLF-LF} (0.04 Гц)	f_{LF-HF} (0.15 Гц)	$f_{HF-0.5}$ (0.40 Гц)
1.25	0.050	0.188	0.500
1.20	0.048	0.180	0.480
1.10	0.044	0.165	0.440
1.00	0.040	0.150	0.400
0.90	0.036	0.135	0.360
0.80	0.032	0.120	0.320
0.70	0.028	0.105	0.280
0.60	0.024	0.090	0.240
0.50	0.020	0.038	0.200
0.40	0.016	0.024	0.160

Таблица 1. Скорректированные частотные границы диапазонов спектральной мощности сердечных сокращений для различных значений RR_{cp} .

ВЫВОДЫ.

1. Согласно полученным результатам, зависимость частоты пиков на графике спектральной плотности для исходного ряда RR-интервалов от величины RR_{cp} можно представить следующей формулой: $f_{п1.0} = f_{п} : RR_{cp}$, где $f_{п1.0}$ - частота пика при $RR_{cp} = 1.0$ сек, $f_{п}$ - частота пика при текущей RR_{cp} .
2. Для коррекции (нормирования) границ частотных диапазонов спектральной мощности (f_d) исходного ряда RR-интервалов относительно текущей RR_{cp} можно воспользоваться формулой: $f_d = f_{d1.0} \times RR_{cp}$, где $f_{d1.0}$ - граница частотного диапазона при $RR_{cp} = 1.0$ сек.
3. Коррекция (нормирование) границ частотных диапазонов спектральной мощности (f_d), частотных пиков ($f_{п1.0}$) исходного ряда RR-интервалов относительно текущей RR_{cp} позволяет сравнивать различные ряды кардиоинтервалов без использования преобразования к эквидистантному ряду.

Литература.

1. Eckberg D.L., Rea R.F., Andersson O.K., Hedner T., Pernow J., Lundberg J.M., Wallin B.G. Baroreflex modulation of sympathetic activity and sympathetic neurotransmitters in humans. //Acta Physiol Scand. 1988; 133:221.
2. Grossman P., Karemaker J., Wieling W. Prediction of tonic parasympathetic cardiac control using respiratory sinus arrhythmia: the need for respiratory control. //Psychophysiol. 1991; 28:201.
3. Кутерман Э.М., Хаспекова Н.Б. Ритм сердца при пробе шесть дыханий в минуту. // Физиология человека, 1992, Т.18, №4. С.52.
4. Laude D., Weise F., Girard A., Elghozi J.L. Spectral analysis of systolic blood pressure and heart rate oscillations related to respiration. //Clin. Exp. Pharmacol. Physiol. 1995; 47(1) :352.
5. Zhang P.Z., Tapp W.N., Reisman S.S., Natelson B.H. Respiration response curve analysis of heart rate variability. //IEEE Trans Biomed Eng. 1997; 23(4) :321.

6. Brown T.E., Beightol L.a., Koh J., Eckberg D.L. Important influence of respiration on human RR interval power spectral is largely ignored. //J. Appl. Physiol. 1993; 75:2310.
7. Кутерман Э.М., Цыденов М.М. Исследования синусового ритма сердца в послеоперационном периоде нейрохирургических больных. //Анестезиология и реаниматология. 1984, № 5, С.53.
8. Diehl R.R., Linden D., Berlit P. Determinants of heart rate variability during deep breathing: basic findings and clinical applications. //Clin Auton Res. 1997; 82(4):131.
9. Блудов А.А., Воронцов В.А. Динамический анализ variability сердечного ритма при гипервентиляции. //Физиология человека, 1998, Т.24, №6, С.66.
10. Malik M. Heart Rate Variability Standards (Response). //Circulation. 1996; 96: 1589.
11. Кенделл М.Дж., Стьюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. - М.: Наука, 1976. 736 с.
12. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standarts of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use. //Circulation 1996; 93: 1043.