

**Классификация функциональных состояний и диагностика
психоэмоциональной устойчивости на основе факторной структуры
показателей вариабельности сердечного ритма.**

В. А. Машин, М.Н. Машина

Нововоронежский учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС

Резюме

Представлены результаты исследований, посвященных факторному анализу показателей вариабельности сердечного ритма и определению наиболее информативных для диагностики функциональных состояний и оценки уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам. Обосновывается 3-х факторная структура, которая включает в себя интегральный уровень вариабельности сердечного ритма (1), баланс между активностью вагуса и корково-лимбических структур головного мозга (2), интегральный уровень функционирования сердечно-сосудистой системы (3). Результаты факторного анализа были использованы для построения классификации функциональных состояний, для их дифференциальной диагностики, а также для разработки и проверки алгоритма оценки уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, факторный анализ, функциональные состояния, психоэмоциональная устойчивость.

Mashin V.A., Mashina M.N.

The functional state classification and evaluation of the stability level in mental loads based on the factor structure of heart rate variability parameters.

Ross Fiziol Zh Im I M Sechenova. 2004 Dec;90(12):1508-21. Russian.

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

Abstract

In the given paper outcomes of the researches devoted to factor analysis of heart rate variability parameters and definition of the most informative parameters for diagnostics of functional states and an evaluation of level of stability to mental loads are submitted. Factor structure of parameters, which includes an integrated level of heart rate variability (1), balance between activity of vagus and cortico-limbic systems of brain (2), an integrated level of cardiovascular system functioning (3) is justified. Factor analysis outcomes have been used for construction of functional states classification, for their differential diagnostics, and also for development and check of algorithm for an evaluation of level of stability to mental loads.

Keywords: heart rate variability, factor analysis, functional states, psycho-emotional stability.

Многочисленные методы анализа variability сердечного ритма рано или поздно ставят перед исследователем задачу выделения из них наиболее информативных для целей своего исследования. В лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра подготовки специалистов для АЭС (ЛПФО НВУТЦ) анализ variability сердечного ритма используется для дифференциальной диагностики различных функциональных состояний операторов и оценки устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам при отборе кандидатов. В данной статье представлены результаты факторного анализа показателей variability сердечного ритма и на основе выделенной 3-х факторной структуры определяются наиболее информативные показатели. С помощью этих показателей строится классификация функциональных состояний и выделяются дополнительные психофизиологические критерии для диагностики устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам на основе данных анализа variability сердечного ритма и результатов психологического тестирования.

Методика

В исследовании были использованы данные, полученные в процессе медико-функциональных и психофизиологических обследований персонала АЭС в ЛПФО НВУТЦ. Регистрация QRS-комплексов нормальных синусовых кардиоциклов электрокардиограммы (ЭКГ) и последующее выделение из них RR-интервалов (в миллисекундах) производилась с помощью 3-х канальных программно-аппаратурных комплексов "RITMON-1" и «Варикард-1.51» (частота дискретизации 500 Гц). Хранение, редактирование RR-интервалов (коррекция артефактов, экстрасистол на ритмограмме) и расчет показателей variability сердечного ритма производились с применением компьютерной программы "MABP.DBase-HRV", разработанной в ЛПФО НВУТЦ. В анализе использовались "скользящие" выборки объемом 256 RR-интервалов и шагом 10 RR-интервалов. Статистический анализ был выполнен с помощью пакета программ "Statistica for Windows 6.0". Психоэмоциональная нагрузка моделировалась с помощью методики Шульте-Горбова: последовательный поиск 25 черных чисел в убывающей, а 24 красных чисел в возрастающей последовательности в таблице из 49 чисел (компьютерный вариант трех заданий данной методики был специально разработан в ЛПФО НВУТЦ).

Исходным материалом для проведения факторного анализа послужила референтная группа (RG), которую составили 236 здоровых обследуемых (мужчины, средний возраст (лет) - 34.08, среднее квадратическое отклонение (SD, лет) - 7.85). Регистрация сердечного ритма производилась в положении сидя в утренние часы (продолжительность регистрации 10 мин). Для анализа было отобрано 10036 «скользящих» выборок.

Дополнительно по материалам обследований в ЛПФО НВУТЦ были сформированы 4 «функциональные» группы (мужчины, 32 человека в каждой группе): FG1 – норма (возраст -

32.11, SD - 5.79); FG2 – психическое напряжение (возраст - 28.43, SD - 4.82); FG3 – невротическое перевозбуждение (возраст - 35.22, SD - 7.55), FG4 – утомление, снижение функциональных резервов (возраст - 31.11, SD - 6.81). Регистрация сердечного ритма производилась в положении сидя в утренние часы. Продолжительность регистрации для групп FG1, FG3 и FG4 (в состоянии ожидания выполнения методики Шульте-Горбова) составила 10 мин, для FG2 (в процессе выполнения методики) зависела от времени выполнения. Для FG3 характерным были повышение шкал невротизации по тесту MMPI (вариант Ф.Б.Березина), трудности следовать инструкции сидеть спокойно, не двигаться перед выполнением методики Шульте-Горбова, общее перевозбуждение и дезорганизация в процессе психофизиологического обследования. Астеническая симптоматика (FG4) диагностировалась в случае снижения продуктивности, ухудшения памяти и внимания при выполнении тестовых заданий в ходе психофизиологического обследования, а также при жалобах обследуемых на повышенную утомляемость. К норме (FG1) были отнесены все те обследуемые, у которых отсутствовала невротическая или астеническая симптоматика.

В исследовании использовались средние значения показателей variability сердечного ритма по каждому обследуемому (согласно работам Дж. Бокса и С. Андерсена, когда объемы выборок равны, влиянием неоднородности дисперсий на уровень значимости t-критерия Стьюдента при сравнении средних по группам можно пренебречь [2]).

Пробы на контролируемое дыхание проводились в утренние часы, в спокойном состоянии. В них участвовали 15 мужчин (возраст - 29.01, SD - 3.97), которые в течение 5 минут равномерно дышали с частотой 0.1 Гц. Для анализа было отобрано 222 "скользящие" выборки.

В работе также был использован фрагмент (652 RR-интервала) записи сердечного ритма спортсмена-профессионала (триатлон) во время глубокого сна (<http://www.physionet.org/physiobank/database/meditation/data/ironman/default.html>, запись I1). Кроме того, дополнительно были сформированы два массива по 100 выборок: первая с использованием моделей «гауссова шума» [RandG-функция из набора пакета Delphi-5: среднее (M) - 800, SD возрастало от 5.91 до 99.82, объем выборок 600 значений], вторая - «белого шума» (Random-функция из набора пакета Delphi-5: M - 1000, SD изменялось от 5.77 до 146.35, объем выборок 600 значений).

В качестве независимого критерия уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам кандидатов на оперативные должности были использованы экспертные оценки. В состав экспертов вошли психологи и инструкторы НВУТЦ, представители АЭС. Анализировались действия и поведение кандидатов в ситуациях, вызывающих психоэмоциональную нагрузку: профессиональный отбор (обследования), экзамены, противоаварийные тренировки, критические ситуации в профессиональной деятельности. Уровень устойчивости к психоэмоциональным

нагрузкам (SS – stress stability) оценивался по 4-х бальной шкале: 4 - высокий уровень, 3 - средний, 2 - низкий, 1 - очень низкий. Этот показатель являлся одним из важнейших при рекомендации кандидата к оперативной деятельности (при SS ниже 3 баллов кандидат не рекомендовался к оперативной работе). Были отобраны 249 кандидатов, по которым имелись согласованные оценки уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам по всем экспертам (мужчины, возраст – 32.12, SD - 7.43). Все кандидаты имели высокую мотивацию на успешное прохождение процедуры обследования. Сердечный ритм регистрировался в процессе выполнения третьего (наиболее сложного) задания методики Шульте-Горбова. В анализе использовались средние значения показателей variability сердечного ритма по каждому обследуемому, а также суммарный показатель (sT) выполнения методики по всем трем заданиям: $sT = \Sigma(T_i + 10 \times NC_i + 20 \times NS_i)$, (где T - время выполнения задания, NC - количество ошибок на цвет, NS - количество ошибок на последовательность, i – номер задания).

Для проведения факторного анализа были включены следующие показатели variability сердечного ритма: M – среднее значение RR-интервалов; SDNN - среднее квадратическое отклонение нормальных (NN) интервалов (NN – RR-интервалы между комплексами QRS нормальных синусовых кардиоциклов, без артефактов и экстрасистол); RMSSD – квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN; PNN50 – процент количества пар последовательных интервалов NN, различающихся более чем на 50 миллисекунд, от общего количества пар; CV – коэффициент вариации. Из геометрических показателей (вариационная пульсометрия) были отобраны: Mo – мода, AMo – амплитуда моды, MxDMn – вариационный размах массива RR-интервалов; из автокорреляционного анализа - показатель C1 (значение коэффициента автокорреляции после первого сдвига). Показатели спектрального анализа variability сердечного ритма были представлены мощностью спектра в высокочастотной (HF, 0.15-0.4 Гц), низкочастотной (LF, 0.04-0.15 Гц) и очень низкочастотной (VLF, ≤ 0.04 Гц) областях, а также общей мощностью спектра (TP, ≤ 0.4 Гц).

Из показателей графа сердечного ритма [6] в факторный анализ были включены: число узлов (ND) и число ребер графа (NRIB); b1 - тангенс угла наклона линии регрессии графа (независимая переменная – исходный массив RR_n , зависимая переменная – массив RR_{n+1}); LSY – средняя сумма квадратов отклонений узлов графа от линии регрессии вдоль оси Y (фактически, наименьшая сумма квадратов); LSX – средняя сумма квадратов отклонений узлов вдоль оси X от линии, проведенной перпендикулярно линии регрессии графа (абсцисс точки пересечения линий равна M); RLS - отношение LSY/LSX.

Заметим, что коэффициент корреляции между массивами RR_n и RR_{n+1} есть ни что иное, как C1 - коэффициент автокорреляции после первого сдвига. Связь между C1 и b1 можно выразить очень простой формулой: $b1 = C1 \times (S_{n+1}/S_n)$. Поскольку массивы RR_n и RR_{n+1} отличаются друг от друга

лишь на одно значение и их дисперсии фактически равны, то, следовательно, $b_1 = C_1$ и значение коэффициента автокорреляции после первого сдвига совпадает с тангенсом угла наклона линии регрессии графа (коэффициент корреляции между b_1 и C_1 $r = 0.999$). Диапазон изменений показателя b_1 колеблется от 0.0 до 1.00.

Показатель LSY рассчитывался по формуле: $LSY = \Sigma(RR_{i+1} - (b_0 + b_1 \times RR_i))^2 / N$, где b_0 – свободный член уравнения линии регрессии, N – длина ряда (в нашем случае, 255). Когда $b_0=0$ и $b_1=1$ (угол наклона 45 градусов), $LSY = \Sigma(RR_{i+1} - RR_i)^2 / N$. Не трудно заметить, что последняя формула мало отличается от формулы $RMSSD^2 = \Sigma(RR_{i+1} - RR_i)^2 / (N-1)$. Коэффициент корреляции между $\ln(LSY)$ и $\ln(RMSSD)$ $r = 0.9975$ (где \ln – натуральный логарифм). В свою очередь показатель $LSX = \Sigma(RR_i + b_1 \times RR_{i+1} - (M + b_1 \times (b_0 + b_1 \times M)))^2 / N$. При $b_0=0$ и $b_1=1$ формула приобретает следующий вид: $LSX = \Sigma(RR_i + RR_{i+1} - 2 \times M)^2 / N$, что близко к значению дисперсии [коэффициент корреляции между $\ln(LSX)$ и $\ln(SDNN)$ $r = 0.952$].

Результаты исследования и их обсуждение.

С помощью метода главных компонент были выделены три фактора (главные компоненты) с суммарным накопленным вкладом в дисперсию признаков 93.21%. Для облегчения содержательной интерпретации выделенных факторов, предварительно была выполнена процедура вращения главных компонент по принципу Varimax normalized.

Согласно полученным данным (табл. 1), первый фактор (доля общей дисперсии 54%) группирует показатели, которые имеют выраженную положительную связь с $SDNN$ ($r = 0.799 \div 0.991$). Этот фактор можно интерпретировать как фактор интегрального уровня variability RR -интервалов. Для его оценки естественно было выбрать показатель $SDNN$.

Второй фактор (доля общей дисперсии 27%) сгруппировал такие показатели как b_1 и C_1 (в дальнейшем мы будем рассматривать только первый), а также RLS . Для понимания физиологического смысла второго фактора были проанализированы показатели variability сердечного ритма для моделей «гауссова шума» и «белого шума». В обоих случаях именно для показателей b_1 и RLS отсутствовала корреляционная связь с амплитудой «шума»: коэффициент корреляции b_1 с $SDNN$ для «гауссова шума» $r = 0.047$ ($p=0.641$) и для «белого шума» $r = 0.017$ ($p=0.868$), а RLS с $SDNN$, соответственно, 0.005 ($p=0.963$) и 0.059 ($p=0.560$). При этом диапазон колебаний значений b_1 и RLS был крайне узким: $-0.120 \div 0.120$ для b_1 и $0.920 \div 1.000$ для RLS (на рис. 1, А приведен пример линии регрессии и значения показателей variability сердечного ритма для «гауссова шума»).

Показатели	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Ln(SDNN)	0.96352*	0.134169	0.208622
CV	0.95780*	-0.031176	-0.094210
MxDm	0.82682*	0.264553	0.249458
AMo	-0.86689*	-0.178751	-0.136434
Ln(RMSSD)	0.74032*	0.619591	0.247571
Ln(PNN50)	0.71404*	0.600058	0.217473
Ln(TP)	0.95752*	0.144726	0.215046
Ln(VLF)	0.80495*	-0.238961	0.391546
Ln(LF)	0.91198*	0.064304	0.047433
Ln(HF)	0.71411*	0.643343	0.122290
ND	0.87325*	0.377626	0.236039
NRIB	0.79579*	0.394542	0.212756
Ln(LSY)	0.78023*	0.567650	0.242306
Ln(LSX)	0.97129*	-0.163583	0.145460
Ln(RLS)	0.02705	0.972687*	0.179473
b1	-0.03363	-0.957180*	-0.210272
C1	-0.03197	-0.957325*	-0.210958
M	0.24698	0.405445	0.870646*
Mo	0.24747	0.368249	0.886789*

* значение превышает 0.70

Таблица 1. Факторные нагрузки на показатели variability сердечного ритма после вращения главных компонент.

Было выдвинуто предположение, что показатели b1 и RLS могут служить индикаторами степени неопределенности процесса, его хаотичности (ряд исследователей полагают, что в основе variability сердечного ритма лежит именно хаотическая динамика [8]). На это указывают и высокие нагрузки RMSSD, PNN50 и HF (показателей вагусной активности) по второму фактору (табл.1), что согласуется с результатами исследований, которые показали, что детерминированный хаос и периодические компоненты variability сердечного ритма опосредованы, главным образом, вагусным влиянием [10]. Таким образом, если наше предположение верно, то в состоянии напряжения (когда степень неопределенности снижается) показатель b1 должен возрастать (увеличивается угол наклона линии регрессии графа), а значения RLS снижаться (узлы графа стягиваются к линии регрессии). И наоборот, чем более глубокое расслабление (которое сопровождается ростом нелинейной динамики сердечного ритма), тем меньше показатель b1 (угол наклона линии регрессии приближается к нулю), и тем больше значения RLS (узлы графа

удаляются от линии регрессии). Для проверки нашей гипотезы мы воспользовались данными по 4 «функциональным» группам.

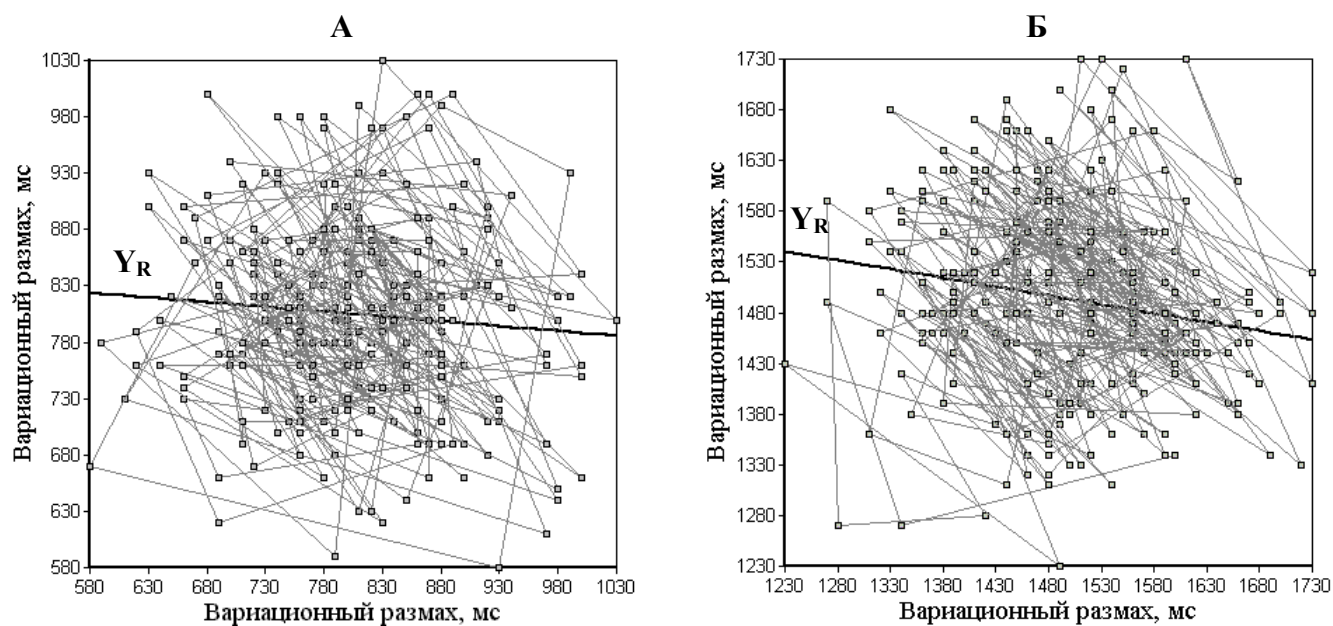


Рисунок 1. Линии регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - модели «гауссова шума» ($M=805$, $SD=87$, $RLS=0.975$, $b_1=-0.085$); Б - сердечного ритма во время сна ($M=1495$ мс, $SD=100$ мс, $RLS=0.891$, $b_1=-0.174$).

В табл. 2 приведены средние и SD для каждой группы. Также для каждой пары «функциональных» групп рассчитывался t-критерий Стьюдента для оценки различий средних. Для всех пар уровень статистической значимости t-критерия $p < 0.001$. Единственное исключение составили группы FG1 и FG4: t-критерий показателя M для этих групп имеет $p=0.017$. Как и ожидалось, для состояния покоя (когда наиболее велико влияние вагуса, парасимпатической нервной системы) характерны низкие значение b_1 и высокие RLS (табл. 2, FG1 и FG4; рис. 2, А; рис. 3, Б). В состоянии напряжения (табл. 2, FG2; рис. 2, Б) картина меняется на противоположную.

Группы	M	SDNN	RLS	b1
FG1	993.2 (104.16)	55.04 (11.57)	0.548 (0.234)	0.409 (0.192)
FG2	548.6 (83.03)	14.83 (3.11)	0.117 (0.074)	0.817 (0.085)
FG3	717.0 (80.14)	70.45 (18.16)	0.048 (0.027)	0.914 (0.041)
FG4	940.0 (64.90)	23.69 (3.25)	0.343 (0.162)	0.579 (0.132)
RG	861.8 (128.31)	49.20 (20.76)	0.180 (0.161)	0.753 (0.156)

Таблица 2. Основные показатели variability сердечного ритма (средние и SD) для различных групп.

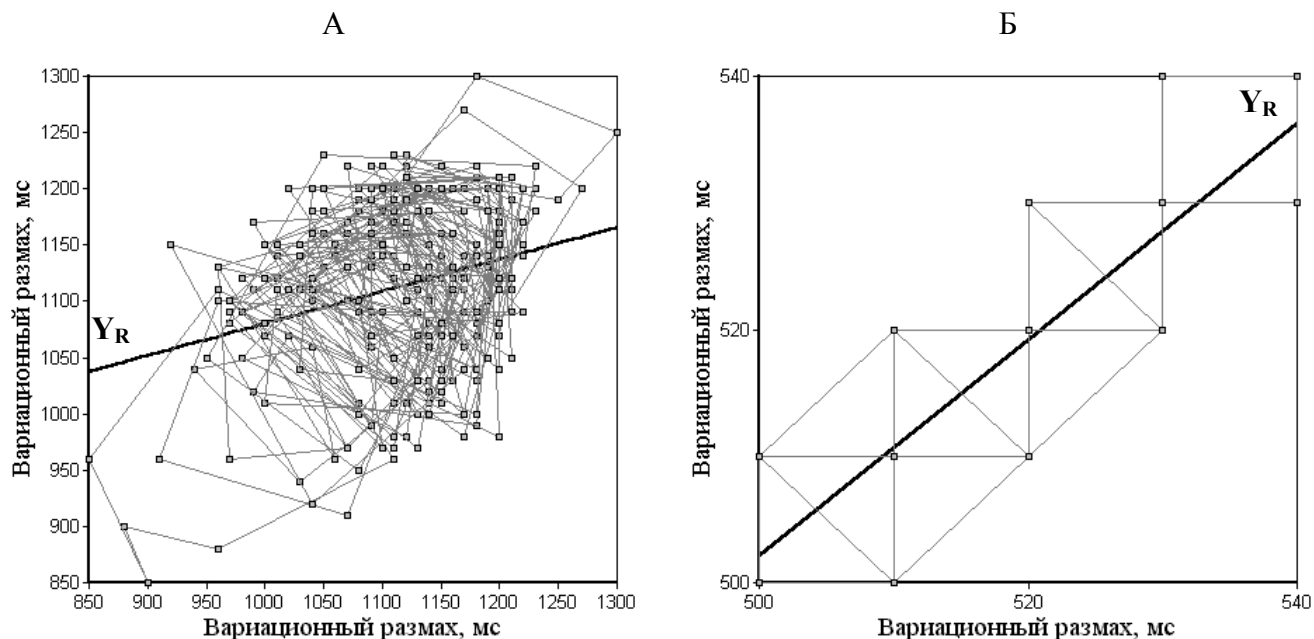


Рисунок 2. Линия регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - сердечного ритма в состоянии покоя, норма ($M=1112$ мс, $SD=79$ мс, $RLS=0.738$, $b_1=0.285$); Б – сердечного ритма во время психической нагрузки ($M=514$ мс, $SD=8$ мс, $RLS=0.087$, $b_1=0.852$).

Но что очень важно, максимальные значения b_1 (минимальные RLS) наблюдаются в состоянии невротического возбуждения (табл. 2, FG3; рис. 3, А), когда возрастает, согласно сформулированной в [5] гипотезе, активность влияния корково-лимбических структур головного мозга (формирующих эмоции страха, тревоги) на регуляцию сердечного ритма. Следовательно, снижение показателя b_1 и повышение RLS (опосредованное главным образом вагусным влиянием) может служить индикатором роста хаотичности в динамике сердечного ритма (которая достигает максимума во время глубокого сна - рис. 1, Б), а повышение b_1 и снижение RLS указывать на возрастание влияния корково-лимбических структур на регуляцию сердечного ритма. Таким образом, второй фактор отражает баланс между активностью вагуса и корково-лимбических структур (автономного и центрального контуров по Р.М.Баевскому [1]).

Отдельно остановимся на показателе RLS. Пробы на контролируемое дыхание показали, что значения RLS совпадают с заданной частотой 0.1 Гц (среднее значение RLS по всем выборкам = 0.101, $SD = 0.015$, уровень статистической значимости различий между частотой дыхания и показателем RLS для t-критерия Стьюдента $p = 0.876$). Если предположить, что показатель RLS отражает ведущую (результатирующую) частоту колебаний сердечного ритма, тогда становится понятно, почему в состоянии невротического возбуждения значения RLS снижаются: в регуляции сердечного ритма начинают преобладать волны с очень низкой частотой (табл. 2, FG3). Согласно Р.М.Баевскому, это указывает на преобладание активности центрального контура (корковых механизмов) на регуляцию сердечного ритма [1]. В состоянии напряжения средний показатель RLS равен 0.117 (табл. 2, FG2), что совпадает с колебаниями в LF-диапазоне и в сочетании с их

низкой мощностью указывает на рост концентрации усилий при выполнении психической задачи [9]. В состоянии же покоя, когда возрастает влияние вагуса, увеличивается как мощность колебаний сердечного ритма в HF-диапазоне, так и хаотическая составляющая, происходит повышение значений показателя RLS (для FG4 до 0.343 и FG1 до 0.548, табл. 2), которые при глубоком расслаблении (например, сон) указывают на выраженное преобладание хаотических процессов (рис. 1, Б). По нашим данным, коэффициент корреляции между b_1 и RLS $r = -0.986$. Наиболее точно связь между этими показателями была достигнута при использовании кубического полинома в нелинейном регрессионном анализе ($R = 0.999$). В дальнейшем для оценки второго фактора мы использовали показатель b_1 , который хорошо изучен в рамках линейного регрессионного анализа.

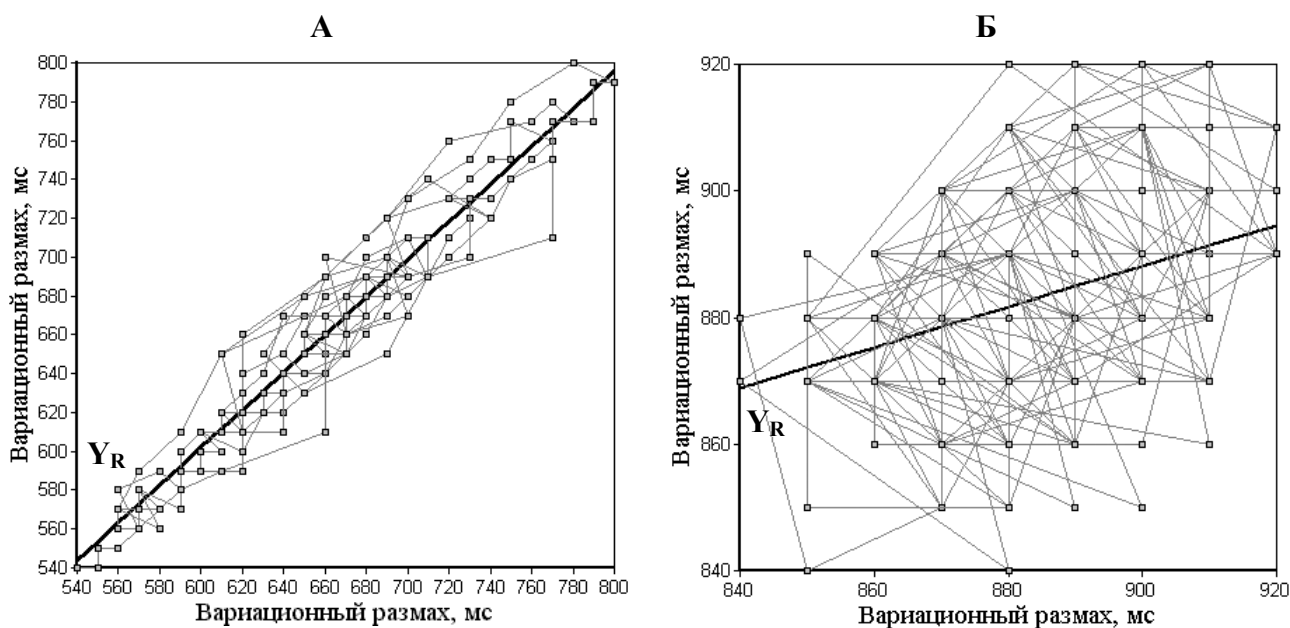


Рисунок 3. Линия регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - сердечного ритма в состоянии невротически-эмоционального возбуждения ($M=661$ мс, $SD=53$ мс, $RLS=0.020$, $b_1=0.969$); Б - сердечного ритма в состоянии покоя при утомлении ($M=882$ мс, $SD=17$ мс, $RLS=0.692$, $b_1=0.321$).

Третий фактор (доля общей дисперсии 12%) имел высокую положительную нагрузку с показателями M и M_0 . Он отражает средний (интегральный) уровень функционирования сердечно-сосудистой системы. Для оценки этого фактора был использован показатель M .

3-х факторная структура variability сердечного ритма позволила на следующем шаге перейти к построению классификации функциональных состояний. Для этих целей методом процентилей было выполнено нормирование основных показателей факторной структуры по данным референтной группы (RG): фактор 1 - $SDNN_n$, фактор 2 - b_1n , фактор 3 - M_n . Нормирование производилось по 9 диапазонам. Границы диапазонов (0.1, 2.3, 15.9, 30.9, 69.1, 84.1, 97.7 и 99.9%) соответствовали следующим значениям SD нормального распределения: -3, -2, -1, -0.5, +0.5, +1, +2, +3 [2]. С помощью нормированных показателей было выделено 8 классов

функциональных состояний. Для первых четырех характерно отсутствие снижения значений по фактору интегрального уровня variability сердечного ритма ($SDNN_n 5 \div 9$).

«Норма» ($SDNN_n 5 \div 9$, $b1n 6 \div 9$, $Mn 5 \div 9$) – у обследуемых, отнесенных к этому классу, отсутствует снижение значений по всем трем факторам структуры variability сердечного ритма. Высокие показатели интегрального уровня variability, преобладание в вегетативном балансе активности вагуса, высокие значения M (снижение частоты сердечных сокращений - ЧСС) характерно, согласно исследованию [5], для состояния покоя, глубокого расслабления, сна при сохранении функциональных резервов (рис. 1, Б; рис. 2, А). При сумме нормированных показателей по всем факторам ≥ 20 , у обследуемых диагностируется состояние глубокого расслабления.

«Напряжение по ЧСС» ($SDNN_n 5 \div 9$, $b1n 6 \div 9$, $Mn 1 \div 4$) - на фоне высоких значений по первому и второму фактору (высокие показатели интегрального уровня variability, преобладание в вегетативном балансе активности вагуса) наблюдается рост ЧСС. Такое функциональное состояние наблюдается при экономичной регуляции сердечного ритма в процессе психической нагрузки на фоне хорошего функционального резерва. Также мы регистрировали его и в состоянии покоя (в ситуации ожидания выполнения психологической методики), что может указывать на готовность организма к предстоящим действиям.

Если в ситуации психоэмоциональной нагрузки диагностируются первые два функциональных класса и значения показателя $SDNN_n \geq 7$, это указывает, по данным медико-функциональных обследований, на вероятность нарушений сердечного ритма и требует дополнительного клинического анализа ЭКГ.

«Эмоциональное возбуждение» ($SDNN_n 5 \div 9$, $b1n 1 \div 5$, $Mn 5 \div 9$) - в этом состоянии регистрируется снижение значений лишь по второму фактору (рост активности корково-лимбических структур головного мозга – формирование эмоций страха, тревоги). Оно наблюдается при эмоциональном возбуждении в ситуации ожидания выполнения ответственного задания (характерно для обследуемых с лабильным типом акцентуации и эмоциональной дезорганизацией в ситуации психологического стресса [4]). При $SDNN > 61$ мс эмоциональное возбуждение оценивается как выраженное.

«Невротически-эмоциональное возбуждение» ($SDNN_n 5 \div 9$, $b1n 1 \div 5$, $Mn 1 \div 4$) - к характерным для эмоционального возбуждения изменениям добавляется рост ЧСС (снижение по третьему фактору). Такое состояние наблюдается в ситуации ожидания ответственного задания и зачастую сопровождается различными невротическими реакциями [4]: невозможность сидеть на одном месте, навязчивые движения и т.п. По данным теста MMPI фиксируется повышенная тревожность. При $SDNN > 54$ мс или $VLF_n > 60\%$ ($VLF_n = 100 \times VLF/TP$: относительная доля VLF-

колебаний в общей мощности спектра сердечных сокращений) невротически-эмоциональное возбуждение оценивается как выраженное (рис. 3, А).

Последние два класса функциональных состояний регистрируются также и в ходе психоэмоциональной нагрузки (в этом случае по результатам выполнения психологической методики необходимо различать компенсированную и некомпенсированную эмоциональную лабильность [4]), и при выполнении проб на контролируемое дыхание, которое сопровождается снижением хаотичности сердечного ритма и выраженным преобладанием колебаний с частотой, равной частоте дыхания. «Невротически-эмоциональное возбуждение» фиксировалось также и при наличии выраженной амплитуды колебаний в LF-диапазоне ($LFn > 60\%$, где $LFn = 100 \times LF/TP$) с частотой около 0.1 Гц (барорефлекторная активность симпатической нервной системы [1]). В этом случае, по данным медико-функциональных обследований, требуется дополнительный контроль артериального давления.

Следующие четыре класса функциональных состояний объединяет снижение значений по фактору интегрального уровня вариабельности сердечного ритма.

«Общее напряжение» ($SDNN_n 1 \div 4$, $b1_n 1 \div 5$, $Mn 1 \div 4$) - при данном функциональном состоянии наблюдается снижение интегрального уровня вариабельности и влияния вагуса на регуляцию сердечного ритма, а также рост ЧСС. Это состояние типично для психоэмоциональной нагрузки и отражает разные степени общего напряжения и концентрации усилий на задаче. Чрезмерное напряжение может вести к снижению скорости и безошибочности выполнения психических задач (рис. 2, Б). При $SDNN \leq 14$ мс или $b1 \geq 0.92$ напряжение оценивается как выраженное (по данным медико-функциональных обследований это указывает на повышенную вероятность развития гипертензии, язвенной болезни, а также депрессивных тенденций, подтверждаемых данными теста MMPI). При выраженном напряжении у обследуемых часто регистрируется тремор пальцев рук, лицевые тики. Значения $VLFn > 60\%$ (высокое влияние корково-лимбических структур [4]), согласно данным психофизиологических обследований (личностный блок методик), указывают на вероятность невротической симптоматики и требуют дополнительной диагностики по личностным тестам.

«Напряжение с дизрегуляцией по ЧСС» ($SDNN_n 1 \div 4$, $b1_n 1 \div 5$, $Mn 5 \div 9$) - это функциональное состояние отличается от предыдущего парадоксальное снижение ЧСС. Такое состояние, по данным психофизиологических обследований [5], регистрировалось при хроническом переутомлении. Результаты медико-функциональных обследований указывали на повышенную вероятность при данном состоянии развития различных патологических процессов (например, атеросклероза, рака) и требовали дополнительных клинических исследований. При $SDNN \leq 14$ мс или $b1 \geq 0.92$ напряжение с дизрегуляцией по ЧСС оценивалась как выраженная.

«Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике» (SDNNn 1÷4, b1n 6÷9, Mn 1÷4) - характеризуется сохранением влияния вагуса (хаотичности динамики сердечного ритма) на фоне снижения интегрального уровня вариабельности и повышения ЧСС. Такое состояние наблюдалось в ситуации психоэмоциональной нагрузки в двух случаях. Во-первых, при действительном сохранении влияния вагуса в регуляции сердечного ритма, и, во-вторых, при выраженном снижении показателей первого и третьего фактора, когда регистрируется парадоксальный низкоамплитудный высокочастотный хаос ($SDNN \leq 14$ мс и $b1 \leq 0.30$). По данным медико-функциональных обследований, парадоксальный низкоамплитудный высокочастотный хаос указывает на повышенную вероятность развития различных сердечно-сосудистых заболеваний и требует дополнительного клинического анализа.

«Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике и ЧСС» (SDNNn 1÷4, b1n 6÷9, Mn 5÷9) - на фоне снижения интегрального уровня вариабельности сердечного ритма сохраняется высокий уровень влияния вагуса (хаотичности сердечной динамики) и низкая ЧСС. Такие показатели регистрируются в состоянии покоя при снижении функциональных резервов (рис. 3, Б) и характерны, по данным психофизиологических обследований, для процессов астенизации [5]. Важно отметить, что речь идет о преобладании влияния вагуса в вегетативном балансе при снижении его активности (тонуса). При $SDNN \leq 14$ мс напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике и ЧСС оценивается как выраженное.

На следующем шаге разработанная классификация функциональных состояний была приложена к рассмотренным ранее 4 «функциональным» группам: «норма», «напряжение», «возбуждение» и «утомление». Это позволило классифицировать всю группу FG1 (32 человека) по функциональному классу «Норма». 30 человек из группы FG2 было классифицировано по классу «Общее напряжение», а оставшиеся 2 – «Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике» (с сохранением влияния вагуса). Из группы FG3 26 человек были классифицированы по классу «Невротически-эмоциональное возбуждение» и 6 – «Эмоциональное возбуждение». 29 человек из группы FG4 классифицировались как «Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике и ЧСС» (утомление) и 3 – «Напряжение с дисрегуляцией по ЧСС» (переутомление). Таким образом, результаты использования разработанной классификации функциональных состояний, базирующейся на 3-х факторной структуре вариабельности сердечного ритма, не только совпали с имеющимися данными, но и позволили сделать важные уточнения.

В заключительной части исследования полученная классификация функциональных состояний была использована для диагностики уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам на основе психофизиологических данных. Для этого мы воспользовались экспертными оценками, результатами регистрации сердечного ритма во время психоэмоциональной нагрузки, а также интегральным показателем выполнения тестовой методики Шульте-Горбова (sT). На стадии

разработки алгоритма диагностики уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам использовались данные по 93 кандидатам на оперативные должности («обучающая» выборка).

По результатам анализа вариабельности сердечного ритма функциональный класс «Норма» (рис. 2, А) был диагностирован у двух кандидатов, которые имели высокие экспертные оценки устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам ($SS\ 3 \div 4$). Само задание и ситуация обследования не вызвали у них затруднений, они легко справились с тестовой методикой (заметим, что у данных кандидатов не диагностировалось состояние глубокого расслабления или нарушения сердечного ритма). Близкая картина была зафиксирована и для функционального класса «Напряжение по ЧСС». Это состояние диагностировалось у 4 обследуемых, для которых были получены высокие оценки показателя SS . Успешное выполнение методики сочеталось у этих кандидатов с экономичной регуляцией сердечного ритма. Полученные результаты позволили сделать вывод, что диагностика первых двух функциональных классов в ситуации выполнения сложной и ответственной задачи (и при наличии положительной мотивации) предполагает высокий уровень психоэмоциональной устойчивости кандидатов, при котором действия в подобных условиях характеризуются продуктивностью (высокой скоростью) и надежностью (безошибочностью).

К функциональному классу «Эмоциональное возбуждение» было отнесено 8 человек: 5 с высокими показателями SS , и 3 – с низкими. Дополнительный анализ показал, что для кандидатов с низкими показателями устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам ($SS\ 1 \div 2$) характерно выраженное повышение интегрального уровня вариабельности сердечного ритма ($SDNN > 61\ мс$) и высокие значения интегрального показателя выполнения тестовой методики ($sT > 700$). Таким образом, чем выше реакция эмоционального возбуждения в процессе психоэмоциональной нагрузки, тем выше негативное воздействие психофизиологических процессов на выполнение деятельности и тем сложнее кандидату компенсировать эмоциональное возбуждение уровнем развития психических процессов [4]. (Можно провести параллель между данной зависимостью и законом Йеркса-Додсона, который установил связь продуктивности выполняемой деятельности с уровнем мотивации). Полученные данные совпадают с результатами тех исследований, в которых было обнаружено, что с ростом сложности психической задачи, когда ее требования превышали возможности обследуемого, снижалась эффективность действий и возрастала вариабельность сердечного ритма [7]. Для дифференциальной диагностики кандидатов по уровню устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам (функциональный класс «Эмоциональное возбуждение») в алгоритм были отобраны пороговые значения показателей: $SDNN = 61\ мс$ и $sT = 700$.

Функциональный класс «Невротически-эмоциональное возбуждение» (рис. 3, А) был диагностирован у 32 кандидатов: 18 с высокими показателями SS , и 14 – с низкими. Для кандидатов с низкими показателями устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам было характерно выраженное повышение интегрального уровня вариабельности сердечного ритма

(SDNN > 54 мс), высокая активность корково-лимбических структур (VLFn > 60%) и высокие значения интегрального показателя выполнения тестовой методики (sT > 700). Существенное отличие этой группы от предыдущей – рост невротической симптоматики у лиц с низкой устойчивостью к психоэмоциональным нагрузкам, которая негативно влияла на продуктивность и надежность деятельности. Для дифференциальной диагностики кандидатов по уровню устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам (функциональный класс «Невротически-эмоциональное возбуждение») в алгоритм были отобраны пороговые значения показателей: SDNN = 54 мс, VLFn = 60% и sT=700.

Максимальное число кандидатов было отнесено к функциональному классу «Общее напряжение» - 37: из них 29 имели высокие показатели SS и 8 – низкие. Для последних было характерно выраженное напряжение (SDNN ≤ 14 мс или b1 ≥ 0.92), повышение влияния корково-лимбических структур (VLFn > 60%) и высокие значения интегрального показателя выполнения тестовой методики (sT > 700). Как и в случае с эмоциональным возбуждением, чрезмерная концентрация усилий ухудшала продуктивность и надежность действий, отрицательно влияла на психические процессы (рис. 2, Б). Для дифференциальной диагностики кандидатов по уровню устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам (функциональный класс «Общее напряжение») в алгоритм были отобраны пороговые значения показателей: SDNN=14 мс, b1=0.92, VLFn=60% и sT=700.

Лишь у одного кандидата диагностировался функциональный класс «Напряжение с дисрегуляцией по ЧСС». Он был отнесен экспертами к группе с высокой устойчивостью к психоэмоциональным нагрузкам. Кандидат справился со всеми тестовыми методиками, но ему была рекомендована профилактика хронического переутомления. Для дифференциальной диагностики кандидатов по уровню устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам (функциональный класс «Напряжение с дисрегуляцией по ЧСС») в алгоритм были отобраны пороговые значения показателей: SDNN=14 мс, b1=0.92 и sT=700.

К функциональному классу «Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике» было отнесено 9 человек: 8 имели высокие показатели SS (для них было характерно сохранение влияния вагуса на регуляцию сердечного ритма) и лишь 1 – низкие. У последнего диагностировался низкоамплитудный хаос (b1 ≤ 0.30) на фоне выраженного напряжения и sT > 700. Анализ ЭКГ установил клинические признаки нарушений в работе сердца. Для дифференциальной диагностики кандидатов по уровню устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам (функциональный класс «Напряжение с дисрегуляцией по парасимпатике») в алгоритм были отобраны пороговые значения показателей: SDNN=14 мс, b1=0.30 и sT=700.

Функциональный класс «Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике и ЧСС (утомление)» не регистрировался в ситуации психоэмоциональной нагрузки (как в «обучающей» выборке, так и в «контрольной»).

Таким образом, анализ данных по «обучающей» выборке позволил выделить физиологические и психологические критерии для дифференциальной диагностики устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам с учетом классов функционального состояния. Заметим, что дополнительно также обозначились методические трудности при использовании методики Шульте-Горбова. Дело в том, что ряд кандидатов настолько быстро выполняли задания, что полученный в результате регистрации сердечного ритма временной ряд RR-интервалов был либо меньше 256 (стандартно используемая выборка в нашем исследовании), либо не отвечала требованию стационарности (что крайне важно, когда мы учитываем такой показатель как VLFn). Для преодоления этих трудностей необходима разработка такой тестовой программы, которая, с одной стороны, несла бы высокую психоэмоциональную нагрузку как методика Шульте-Горбова, а с другой, была бы более продолжительной для выполнения.

На заключительной стадии алгоритм диагностики уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам, с учетом функциональных классов и выделенных психофизиологических критериев, был использован для проверки на «контрольной» выборке кандидатов (156 человек). С помощью нормированных показателей 3-х факторной структуры variability сердечного ритма, кандидаты были отнесены к следующим функциональным классам: «Норма» - 8, «Напряжение по ЧСС» - 8, «Эмоциональное возбуждение» - 7, «Невротически-эмоциональное возбуждение» - 33, «Общее напряжение» - 85, «Напряжение с дизрегуляцией по ЧСС» - 1 и «Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике» - 14 человек. С использованием выделенных психофизиологических критериев каждый кандидат был отнесен либо к группе с высокими показателями SS, либо к группе с низкими показателями SS. Показатель чувствительности (Se) использованного алгоритма для диагностики низкого уровня SS составил 92%, а специфичности (Sp) – 93%, прогностичность положительного результата PVP = 81%, прогностичность отрицательного результата PVN = 97% [3]. Коэффициент Пирсона для двух сопряженных категориальных переменных ($\chi^2 = 104.06$, $p < 0.0001$) и коэффициент максимального правдоподобия ($\chi^2 = 102.27$, $p < 0.0001$) позволили сделать вывод о высокой статистически значимой связи между оценками экспертов и данными психофизиологической диагностики.

Заключение.

Методом факторного анализа показателей variability сердечного ритма были выделены три фактора и определены наиболее информативные для их оценки показатели: первый фактор отражает интегральный уровень variability сердечного ритма (SDNN), второй фактор

характеризует баланс между активностью вагуса и корково-лимбических структур головного мозга (b1), третий фактор тесно связан с интегральным уровнем функционирования сердечно-сосудистой системы (M). Для интерпретации второго фактора использовались модели хаотических процессов, данные по «функциональным» группам, результаты пробы на контролируемое дыхание.

Методом процентилей были получены нормированные значения показателей факторов для референтной группы, которые затем были использованы для построения классификации функциональных состояний. Были выделены 8 функциональных классов и даны их качественные характеристики. Применение разработанной классификации к ранее диагностированным функциональным состояниям подтвердило ее работоспособность, а также позволило сделать важные содержательные уточнения.

С помощью 3-х факторной структуры вариабельности сердечного ритма и классификации функциональных состояний на «обучающей» выборке были определены дополнительные физиологические и психологические критерии и разработан алгоритм для диагностики уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам кандидатов на оперативные должности. Проверка на «контрольной» выборке подтвердила эффективность разработанного алгоритма.

Представленная классификация функциональных состояний на основе 3-х факторной структуры вариабельности сердечного ритма безусловно требуют дальнейших исследований, проверки и уточнений.

Список литературы.

- [1] Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М. Медицина. 1997.
- [2] Гласс Дж., Стэнли Дж. Статистические методы в педагогике и психологии. М. Прогресс. 1976.
- [3] Власов В.В. Эффективность диагностических исследований. М. Медицина. 1988.
- [4] Машин В.А., Машина М.Н., Шмелева И.А. Психофизиологические исследования эмоциональной лабильности операторов АЭС. Вопросы психологии. 4 : 95-103. 1997.
- [5] Машин В.А., Машина М.Н. Анализ вариабельности ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации. Физиология человека. 26 (4) : 48-59. 2000.
- [6] Машин В.А. Анализ вариабельности сердечного ритма с помощью метода графа. Физиология человека. 28 (4) : 63-73. 2002.
- [7] Aashman J., Mulder G., Mulder L.J.M. Operator effort and the measurement of heart rate variability. Human Factors. 29 : 161-172. 1987.

- [8] Guzzetti S., Signorini M.G., Cogliati C., Mezzetti S., Porta A., Cerutti S., Malliani A. Non-linear dynamics and chaotic indices in heart rate variability of normal subjects and heart-transplanted patients. *Cardiovascular Researches*. 31 (3) : 441-449. 1996.
- [9] Hopman J.C.W., Kollee L.A.A., Stoeltinga G.B.A., van Geijn H.P., van Ravenswaaij-Arts C.M.A. Heart Rate Variability. *Annals of Internal Medicine*. 118 : 436-445. 1993.
- [10] Zwiener U., Hoyer D., Luthke B., Schmidt K., Bauer R. Relations between parameters of spectral power densities and deterministic chaos of heart-rate variability. *J. Auton. Nerv. Syst.* 57 (3) : 132-140. 1996.