

**Факторная структура показателей variability сердечного ритма для
классификации функциональных состояний
и диагностики устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам.**

В. А. Машин, М.Н. Машина

Нововоронежский учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС

Резюме

В данной статье представлены результаты исследований, посвященных факторному анализу показателей variability сердечного ритма (ВСР) и определению наиболее информативных для диагностики функциональных состояний и оценки уровня устойчивости к психоэмоциональным нагрузкам. Обосновывается 3-х факторная структура ВСР, которая включает в себя интегральный уровень ВСР (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: variability сердечного ритма, факторный анализ, классификация функциональных состояний, устойчивость к психоэмоциональным нагрузкам.

Mashin V.A., Mashina M.N.

Factor structure of heart rate variability parameters for

functional states classification and an evaluation of level of stability to mental loads.

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 (ВСР) 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 ВСР 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 ВСП, обосновывается 3-х факторная структура ВСП и на ее основе 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 ВСП и результатов психологического тестирования.

Методика

В исследовании были использованы данные, полученные в процессе обследований персонала АЭС в ЛПФО НВУТЦ. Регистрация QRS-комплексов электрокардиограммы (ЭКГ) и последующее выделение из них RR-интервалов (частота дискретизации 500 Гц) производилась с помощью 3-х канальных программно-аппаратурных комплексов "RITMON-1" и «Варикард-1.51». Выражающие длительность сердечных сокращений RR-интервалы (в миллисекундах) сохранялись в ASCII-кодах для дальнейшего компьютерного анализа. Хранение, редактирование RR-интервалов и расчет показателей ВСП производились с применением компьютерной программы "MABP.DB", 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 (компьютерный вариант данной методики был специально разработан в ЛПФО НВУТЦ).

Исходным материалом для проведения факторного анализа послужила референтная группа (RG), которую составили 848 здоровых обследуемых (мужчины, средний возраст (Age, лет) - 29.84, среднее квадратическое отклонение (S, лет) - 6.54). Регистрация сердечного ритма производилась в положении сидя в утренние часы (продолжительность регистрации 10 мин). Для факторного анализа были отобраны средние значения показателей ВСП по каждому обследуемому (N=848).

По данным психофизиологических обследований дополнительно для целей исследования были сформированы 4 «функциональные» группы (мужчины, 32 человека в каждой группе): FG1 – норма, состояние покоя (Age - 32.11, S - 5.79); FG2 – напряжение при выполнении методики Шульте-Горбова (Age - 28.43, S - 4.82); FG3 – возбуждение в процессе ожидания методики (Age - 35.22, S - 7.55), FG4 – утомление, состояние покоя (Age - 31.11, S - 6.81). Регистрация сердечного ритма производилась в положении сидя в утренние часы. Продолжительность регистрации для групп FG1, FG3 и FG4 составила 10 мин, для FG2 зависела от времени выполнения. В исследовании использовались средние значения показателей ВСП 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 можно пренебречь [1]).

Пробы на контролируемое дыхание проводились в утренние часы, в спокойном состоянии. В них участвовали 15 мужчин (Age - 29.01, S - 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 этого, дополнительно были сформированы два массива по 100 выборок: первая с использованием моделей «гауссова шума» (RandG-функция из набора пакета Delphi-5: среднее (M)=800, S возрастало от 5.91 до 99.82, объем выборок 600 значений), вторая - «белого шума» (Random-функция из набора пакета Delphi-5: M=1000, S 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 инструктора 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, Age – 32.12, S - 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 BCP по каждому обследуемому, а также суммарный показатель (sT) выполнения методики по всем трем заданиям: $sT = T_i + 10 \times NC_i + 20 \times NS_i$. (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 статистические методы анализа BCP: M – среднее значение RR-интервалов; SDNN - среднее квадратическое отклонение нормальных интервалов (NN, с исключением 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 методов (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 ВСР были представлены мощностью спектра в высокочастотной (HF), низкочастотной (LF) и очень низкочастотной (VLF) областях, а также общей мощностью спектра (TP).

Из показателей графа сердечного ритма [2] 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, $b1 = C1$ и значение коэффициента автокорреляции после первого сдвига совпадает с тангенсом угла наклона линии регрессии графа (коэффициент корреляции между b1 и C1 $r = 0.999$). Диапазон изменений показателя b1 колеблется от 0.0 до 1.00.

Показатель LSY рассчитывался по формуле: $LSY = (RR_{i+1} - (b0 + b1 \times RR_i))^2 / N$, где b0 – свободный член уравнения линии регрессии, N – длина ряда (в нашем случае, 255). Когда b0=0 и b1=1 (угол наклона 45 градусов), $LSY = (RR_{i+1} - RR_i)^2 / N$. Не трудно заметить, что последняя формула совпадает с формулой RMSSD² (коэффициент корреляции между ln(LSY) и ln(RMSSD) $r = 0.9975$, где ln – натуральный логарифм). В свою очередь показатель LSX = $(RR_i + b1 \times RR_{i+1} - (M + b1 \times (b0 + b1 \times M)))^2 / N$. При b0=0 и b1=1 формула приобретает следующий вид: $LSX = (RR_i + RR_{i+1} - 2 \times M)^2 / N$, что близко к значению дисперсии (коэффициент корреляции между ln(LSX) и ln(SDNN) $r = 0.952$).

Результаты исследования и их обсуждение.

Выполнение факторного анализа требует, чтобы распределение каждого анализируемого количественного признака подчинялось нормальному закону. Для проверки гипотезы о нормальности распределения показателей ВСР мы воспользовались критериями Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова (с поправкой Лиллиефорса). Предварительно распределения показателей ВСР были преобразованы к нормальному (табл. 1). Согласно полученным уровням значимости критерия Шапиро-Уилка (табл. 1), мы можем принять гипотезу о нормальности распределения преобразованных показателей ВСР ($p > 0.05$). Лишь для показателя PNN50 эта гипотеза была отвергнута. По этой причине он был исключен из факторного анализа. Выводы о нормальности

распределения преобразованных показателей ВСП были подтверждены и критерием Колмогорова-Смирнова: для всех показателей, которые были включены в факторный анализ, $p > 0.20$ (лишь для LSY $p < 0.10$).

Показатели ВСП	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	p
ln(SDNN+6)	0.991*	0.070	0.093	0.611
ln(CV)	0.952*	-0.134	-0.266	0.417
ln(MxDMn+100)	0.926*	0.174	0.112	0.818
ln(AMo+20)	-0.949*	-0.114	-0.066	0.282
1/ln(RMSSD+20)	-0.777*	-0.609	-0.149	0.166
ln(TP+104)	0.991*	0.053	0.102	0.739
1/ln(VLF+126)	-0.859*	0.272	-0.223	0.587
ln(LF+28)	0.916*	-0.074	0.023	0.938
ln(HF+15)	0.746*	0.630	-0.003	0.218
ln(1/(256-ND)-0.00365)	0.914*	0.347	0.150	0.347
ln(1/(255-NRIB)-0.00265)	0.815*	0.494	0.204	0.140
ln(LSY+43)	0.819*	0.553	0.141	0.066
ln(LSX+87)	0.964*	-0.241	0.046	0.269
ln(RLS-0.012)	0.059	0.983*	0.152	0.147
ln(1/(1-b1)-0.27)	-0.059	-0.985*	-0.150	0.409
ln(1/(1-C1)-0.14)	-0.058	-0.985*	-0.150	0.158
ln(M)	0.318	0.471	0.819*	0.911
ln(Mo-25)	0.318	0.446	0.833*	0.658

* значение факторной нагрузки превышает 0.70

Таблица 1. Факторные нагрузки на показатели ВСП, распределения которых преобразованы к нормальному, а также уровень значимости критерия Шапиро-Уилка (p).

В факторном анализе использовались коэффициенты корреляции Пирсона. Выделение факторов производилось методом главных компонент. С помощью критерия "каменистой осыпи" (Кэттел) и критерия Кайзера были отобраны 3 наиболее значимые фактора с суммарным накопленным вкладом в дисперсию признаков 96.37%. Для максимизации величин факторных нагрузок на показатели ВСП и облегчения содержательной интерпретации выделенных факторов, предварительно была выполнена процедура вращения факторов методом *Bi-quartimax raw*.

Согласно полученным данным (табл. 1), первый фактор (доля общей дисперсии 59.3%) группирует показатели, которые имеют выраженную положительную связь с SDNN (r

0.799±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 27.6%) сгруппировал такие показатели как b1 и C1 (в дальнейшем мы будем рассматривать только первый), а также RLS. Для понимания физиологического смысла второго фактора были проанализированы показатели ВСП для моделей «гауссова шума» и «белого шума». В обоих случаях именно для показателей b1 и RLS отсутствовала корреляционная связь с амплитудой «шума»: коэффициент корреляции b1 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 b1 и RLS был крайне узким: $-0.120 \div 0.120$ для b1 и $0.920 \div 1.000$ для RLS (на рис. 1, А приведен пример линии регрессии и значения показателей ВСП для «гауссова шума»).

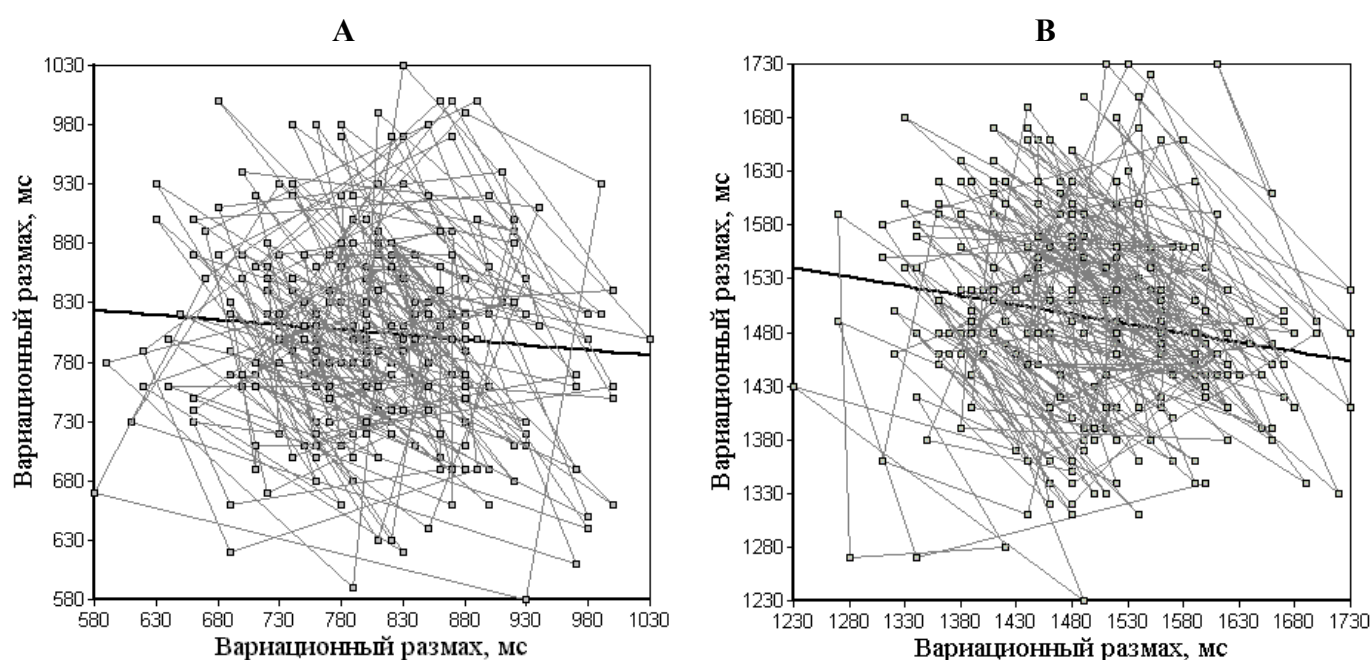


Рис. 1. Линии регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - модели «гауссова шума» ($M=805$, $S=87$, $RLS=0.975$, $b_1=-0.085$); В - сердечного ритма во время сна ($M=1495$ мс, $S=100$ мс, $RLS=0.891$, $b_1=-0.174$).

Было выдвинуто предположение, что показатели b1 и RLS могут служить индикаторами степени неопределенности процесса, его хаотичности (ряд исследователей полагает, что в основе ВСП лежит именно хаотическая динамика [3]). На это указывают и высокие нагрузки RMSSD и HF (показателей вагусной активности) по второму фактору (табл.1), что согласуется с результатами исследований, которые показали, что детерминированный хаос и периодические компоненты ВСП опосредованы, главным образом, вагусным влиянием [4]. Таким образом, если наше предположение верно, то в состоянии напряжения (когда степень неопределенности снижается) показатель b1 должен возрасти (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 b_1 (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.

	M	SDNN	RLS	b_1
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 ВСП (средние и S) для различных групп.

В табл. 2 приведены средние и S 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 значения b_1 и высокие RLS (табл. 2, FG1 и FG4; рис. 2, А; рис. 3, В). В состоянии напряжения (табл. 2, FG2; рис. 2, В) картина меняется на противоположную.

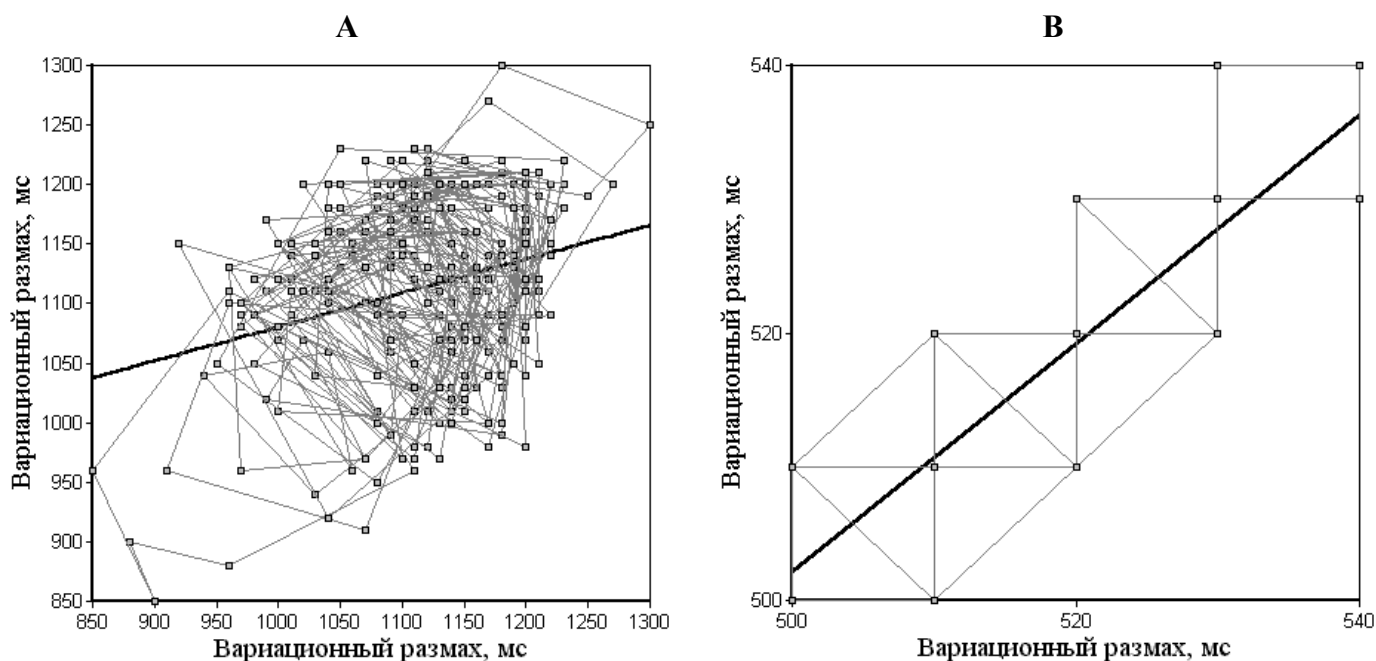


Рис. 2. Линия регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - сердечного ритма в состоянии покоя, норма ($M = 1112$ мс, $S = 79$ мс, $RLS = 0.738$, $b_1 = 0.285$); В – сердечного ритма во время психической нагрузки ($M = 514$ мс, $S = 8$ мс, $RLS = 0.087$, $b_1 = 0.852$).

Но что очень важно, максимальные значения b_1 (минимальные RLS) наблюдаются в состоянии возбуждения (табл. 2, FG3; рис. 3, А), когда возрастает активность корково-лимбических структур головного мозга в регуляции сердечного ритма [5]. 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, В), а повышение b_1 и снижение RLS указывать на возрастание влияния корково-лимбических структур. Таким образом, второй фактор отражает баланс между активностью вагуса и корково-лимбических структур.

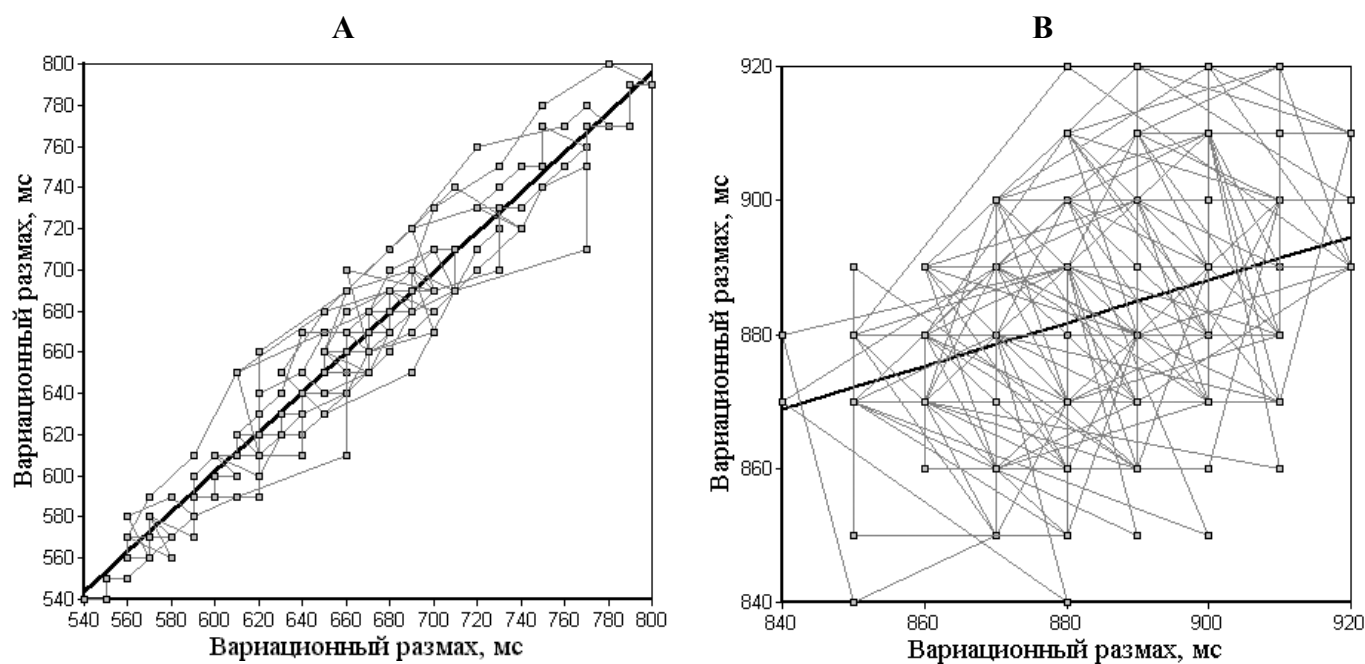


Рис. 3. Линия регрессии ($Y_R = b_0 + b_1 \times RR_n$) для графа: А - сердечного ритма в состоянии нервно-эмоционального возбуждения ($M=661$ мс, $S=53$ мс, $RLS=0.020$, $b_1=0.969$); В – сердечного ритма в состоянии покоя при утомлении ($M=882$ мс, $S=17$ мс, $RLS=0.692$, $b_1=0.321$).

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, $S = 0.015$, уровень статистической значимости различий между частотой дыхания и показателем RLS для t-критерия Стьюдента $p = 0.876$). Если предположить, что показатель RLS отражает ведущую (результующую) частоту колебаний сердечного ритма, тогда становится понятно, почему в состоянии возбуждения значения RLS снижаются: в регуляции сердечного ритма начинают преобладать волны с очень низкой частотой (табл. 2, FG3). 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 [6]. 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, В). По нашим данным, коэффициент корреляции между $b1$ 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 анализе мы воспользовались показателем $b1$, который хорошо изучен в рамках линейного регрессионного анализа.

Третий фактор (доля общей дисперсии 9.4%) 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 ВСП 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 - $b1_n$, 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 S нормального распределения: $-3, -2, -1, -0.5, +0.5, +1, +2, +3$ [1]. С помощью нормированных показателей было выделено 8 классов функциональных состояний. Для первых четырех характерны высокие значения по фактору интегрального уровня variability сердечного ритма.

«Норма» ($SDNN_n 5 \div 9, b1_n 6 \div 9, M_n 5 \div 9$) - обследуемые, отнесенные к этому классу, имеют также высокие значения по второму фактору (преобладание в балансе активности вагуса) и третьему (отсутствует повышение частоты сердечных сокращений - ЧСС). Такие показатели характерны для состояния покоя, глубокого расслабления, сна при сохранении функциональных резервов (рис. 1, В; рис. 2, А). При сумме нормированных показателей по всем факторам ≥ 20 , у обследуемого диагностируется состояние глубокого расслабления.

«Напряжение по ЧСС» ($SDNN_n 5 \div 9, b1_n 6 \div 9, M_n 1 \div 4$) - на фоне высоких значений по первому и второму фактору наблюдается рост частоты сердечных сокращений (ЧСС). Такое функциональное состояние характерно для лиц с высоким тонусом активности в состоянии покоя, а также при экономичной регуляции сердечного ритма в процессе психической нагрузки. Если в ситуации психоэмоциональной нагрузки диагностируются первые два функциональных класса и значения показателя $SDNN_n \geq 7$, это указывает на вероятность нарушений сердечного ритма и требует дополнительного клинического анализа ЭКГ.

«Эмоциональное возбуждение» ($SDNN_n 5 \div 9, b1_n 1 \div 5, M_n 5 \div 9$) - в этом состоянии регистрируется снижение значений лишь по второму фактору (рост активности корково-лимбических структур головного мозга), что характерно для эмоционального возбуждения в ситуации ожидания выполнения ответственного задания. При $SDNN > 61$ мс у обследуемого диагностируется выраженное эмоциональное возбуждение.

«Нервно-эмоциональное возбуждение» (SDNNn 5÷9, b1n 1÷5, Mn 1÷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: повышенная тревожность, невозможность сидеть на одном месте, навязчивые движения и т.п. При SDNN > 54 мс или VLFn > 60% (VLFn=100×VLF/TP: относительная доля VLF-колебаний в общей мощности спектра сердечных сокращений) у обследуемого диагностируется выраженное нервно-эмоциональное возбуждение (рис. 3, А).

Последние два класса функциональных состояний регистрируются также и в ходе психоэмоциональной нагрузки (в этом случае необходимо различать компенсированную и некомпенсированную эмоциональную лабильность), и при выполнении проб на контролируемое дыхание, которое сопровождается снижением хаотичности сердечного ритма и выраженным преобладанием колебаний с частотой, равной частоте дыхания. «Нервно-эмоциональное возбуждение» фиксировалось также и при наличии выраженной амплитуды колебаний в LF-диапазоне (LFn>60%, где LFn=100×LF/TP) с частотой около 0.1 Гц (барорефлекторная активность симпатической нервной системы). В этом случае требовался дополнительный контроль артериального давления.

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

«Общее напряжение» (SDNNn 1÷4, b1n 1÷5, Mn 1÷4) - при данном функциональном состоянии наблюдается рост активности корково-лимбических структур и снижение 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, В). При SDNN ≤ 14 мс или b1 ≥ 0.92 у обследуемого диагностируется выраженное напряжение (индикатор развития гипертензии, язвенной болезни, а также депрессивных тенденций, подтверждаемых данными теста ММПИ; в поведении может отмечаться тремор). При VLFn > 60% регистрируется высокое влияние корково-лимбических структур (скрытая невротическая симптоматика).

«Напряжение с дизрегуляцией по ЧСС» (SDNNn 1÷4, b1n 1÷5, Mn 5÷9) - это функциональное состояние отличает от предыдущего парадоксальное снижение ЧСС. Такое состояние отмечается при хроническом переутомлении, а также может служить индикатором патологических процессов (например, развития атеросклероза, рака). При SDNN ≤ 14 мс или b1 ≥ 0.92 у обследуемого диагностируется выраженное напряжение с дизрегуляцией по ЧСС.

«Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике» (SDNNn 1÷4, b1n 6÷9, Mn 1÷4) - характеризуется сохранением влияния вагуса (хаотичности динамики сердечного ритма) на фоне

снижения интегрального уровня variability и повышения ЧСС. Такое состояние можно наблюдать 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 $b1 \leq 0.30$). Диагностика такого хаоса может служить индикатором развития различных сердечно-сосудистых заболеваний.

«Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике и ЧСС» ($SDNN_n 1 \div 4$, $b1_n 6 \div 9$, $M_n 5 \div 9$) - на фоне снижения интегрального уровня variability сердечного ритма сохраняется высокий уровень влияния вагуса (хаотичности сердечной динамики) и низкая ЧСС. Такие показатели характерны для состояния покоя при снижении функциональных резервов (рис. 3, В). Неслучайно мы ни разу не диагностировали этот класс функциональных состояний при выполнении тестовой методики. Важно отметить, что речь идет о преобладании влияния вагуса в вегетативном балансе при снижении его активности (тонуса). При $SDNN \leq 14$ мс у обследуемого диагностируется выраженное напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике и ЧСС.

На следующем шаге разработанная классификация функциональных состояний была приложена к данным ранее хорошо исследованных «функциональных групп»: «норма», «напряжение», «возбуждение» и «утомление» [2]. Использование нормированных значений факторов ВСП отнесли всю группу «норма» (32 человека) к функциональному классу «Норма». 30 человек из группы «напряжение» было классифицировано по классу «Общее напряжение», а оставшиеся 2 – «Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике» (с сохранением влияния вагуса). Из группы «возбуждение» 26 человек были классифицированы по классу «Нервно-эмоциональное возбуждение» и 6 – «Эмоциональное возбуждение». 29 человек из группы «утомление» классифицировались как «Напряжение с дизрегуляцией по парасимпатике и ЧСС» (утомление) и 3 – «Напряжение с дизрегуляцией по ЧСС» (переутомление). Таким образом, результаты использования разработанной классификации функциональных состояний, базирующейся на 3-х факторной структуре ВСП, 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 ВСР 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 [7]. (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 [8]. 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 «Нервно-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 «Нервно-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 ($SDNN \leq 14$ мс или $b1 \geq 0.92$), 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, В). 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 ($b1 \leq 0.30$) 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 дисрегуляцией 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, неслала 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 VCP, кандидаты были отнесены к следующим функциональным классам: «Норма» - 8, «Напряжение по ЧСС» - 8, «Эмоциональное возбуждение» - 7, «Нервно-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% [9]. 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 VCP были выделены три фактора и определены наиболее информативные для их оценки показатели: первый фактор отражает интегральный уровень вариабельности 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 ВСР 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.

Список литературы.

1. Гласс Дж., Стэнли Дж. Статистические методы в педагогике и психологии. М.: Прогресс, 1976.
2. Машин В.А. Анализ вариабельности сердечного ритма с помощью метода графа // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 4. С. 63.
3. 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 // *Cardiovasc. Res.* 1996. V. 31. № 3. P. 441.
4. 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.* 1996. V. 57. № 3. P. 132.
5. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ вариабельности ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации // Физиология человека. 2000. Т. 26. №4. С. 48.
6. Hopman J.C.W., Kollee L.A.A., Stoelinga G.B.A., van Geijn H.P., van Ravenswaaij-Arts C.M.A. Heart Rate Variability // *Annals of Internal Medicine.* 1993. V. 118. P. 436.
7. Машин В.А., Машина М.Н., Шмелева И.А. Психофизиологические исследования эмоциональной лабильности операторов АЭС // Вопросы психологии. 1997. № 4. С. 95.
8. Aashman J., Mulder G., Mulder L.J.M. Operator effort and the measurement of heart rate variability // *Human Factors.* 1987. V. 29. P. 161.
9. Власов В.В. Эффективность диагностических исследований. М.: Медицина, 1988.