

## **Факторный анализ показателей графа сердечного ритма для диагностики различных функциональных состояний и оценки стрессоустойчивости.**

**Машин В.А., Машина М.Н.**

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

В данной статье представлены результаты факторного анализа показателей структуры графа сердечного ритма (HRG). Были выделены три главных фактора, которые отражали вариабельность HRG в LF-диапазоне (уровень психических усилий), в HF-диапазоне (активность вагуса, синусовая дыхательная аритмия) и уровень энтропии (хаотичности) HRG. Регрессионные уравнения факторных оценок были использованы для анализа и дифференциальной диагностики ряда функциональных состояний (психическое напряжение, утомление, невротическое возбуждение), а также для определения уровня стрессоустойчивости кандидатов на оперативную должность. Для оценки уровня стрессоустойчивости в процессе ответственной деятельности дополнительно привлекались показатели эффективности ее выполнения. Полученные результаты доказывают перспективность применения показателей структуры HRG для функциональной диагностики и оценки уровня стрессоустойчивости кандидатов на оперативную должность.

**Ключевые слова:** показатели структуры графа сердечного ритма, факторный анализ, дифференциальная диагностика функциональных состояний, оценка стрессоустойчивости.

## **Factor analysis of heart rate graph parameters.**

**Mashin V.A., Mashina M.N.**

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

In given article are presented the results of factor analysis of parameters of heart rate graph (HRG) structure. Three main factors are reflecting HRG variability in LF-domain (the level of mental effort), in HF-domain (vagus activity, the level of sinus respiratory arrhythmia) and level of uncertainty (the chaos dynamics) of HRG were chosen. Regression equations for factor values were used for analysis and differential diagnostics of functional states (mental strain, neurotic excitement, fatigue), as well as for estimation of stress-stability level of candidates on operative activity. For estimation of stress-stability level the parameters of efficiency of the test tasks performing were in addition attracted. The results demonstrate the efficiency using the parameters of HRG structure for differential diagnostics of functional states and estimations of the stress-stability level of NPP personnel.

**Keywords:** parameters of heart rate graph structure, factor analysis, differential diagnostics of functional states, estimation of stress-stability level.

В статье [1] был представлен метод анализа динамики сердечных сокращений на основе принципов теории графов. Разработанный метод позволил выделить основные показатели структуры графа сердечного ритма (HRG) и проанализировать их содержание с помощью моделей гармонических колебаний, "белого" шума и различных функциональных проб (включая контролируемое дыхание и психическую нагрузку). Была установлена эффективность использования показателей структуры HRG для диагностики ряда функциональных состояний, исследована корреляционная связь показателей структуры HRG с частотными показателями вариабельности сердечного ритма (HRV).

Предлагаемое исследование развивает идеи метода анализа динамики сердечных сокращений на основе принципов теории графов и посвящено факторному анализу показателей структуры HRG и его приложению для решения практических задач диагностики ряда функциональных состояний и профессионального отбора. Мы попытались описать массив показателей HRG и определить структуру их взаимосвязей с помощью факторного анализа. Для каждого фактора методом множественной регрессии были получены соответствующие расчетные формулы, которые были использованы для анализа и дифференциальной диагностики ряда функциональных состояний. На заключительном этапе была рассмотрена эффективность применения факторов показателей структуры HRG для оценки уровня стрессоустойчивости кандидатов для оперативной деятельности. Были определены характерные для лиц с низкой стрессоустойчивостью отношения между значениями факторов.

## Методика

В исследовании были использованы данные, полученные в процессе обследований персонала АЭС в лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра (ЛПФО НВУТЦ). Регистрация QRS-комплексов электрокардиограммы (ЭКГ) и последующее выделение из них RR-интервалов (частота дискретизации 500 Гц) производилась с помощью 3-х канального программно-аппаратурного комплекса "RITMON-1". Выражающие длительность сердечных сокращений RR-интервалы (в миллисекундах) сохранялись в ASCII-кодах для дальнейшего компьютерного анализа.

Исходным материалом для проведения факторного анализа послужили записи ЭКГ, которые осуществлялись в положении сидя в утренние часы до выполнения психологического теста (продолжительность регистрации 10 мин). В этой части исследования приняли участие 236 обследуемых (мужчины, средний возраст (Age, лет) - 37.28, среднее квадратическое отклонение (S, лет) - 8.91). В анализе использовались "скользящие" выборки объемом 256 RR-интервалов и шагом 10 RR (общее число выборок 10036). Редактирование RR-интервалов и расчет показателей структуры графа сердечного ритма производилось с применением компьютерной программы "МАВР-09", разработанной в ЛПФО НВУТЦ. Статистический анализ был выполнен с помощью пакета программ "Statistica for Windows 5.1".

Для дифференциальной диагностики ряда функциональных состояний мы воспользовались материалами нашего предыдущего исследования [1], в котором по результатам обследований были сформированы 4 группы (мужчины, 10 человек в каждой группе) с различными функциональными состояниями: 1 – норма в процессе ожидания начала психологического теста на внимание (компьютерный вариант методики Шульте-Горбова, Age - 30.08, S - 6.69, 1042 выборки), 2 – психическое напряжение при выполнении теста на внимание (Age - 29.59, S - 3.80, 322

выборки), 3 – невротическое возбуждение в процессе ожидания начала теста на внимание (Age - 34.16, S - 7.26, 1506 выборок), 4 – утомление, запись в состоянии относительного покоя (Age - 30.08, S - 6.69, 441 выборка). Всего для анализа было отобрано 3311 "скользящих" выборок объемом 256 RR-интервалов и шагом 10 RR.

Для определения уровня стрессоустойчивости (SL) кандидатов для оперативной работы на АЭС мы воспользовались экспертными оценками. В состав экспертов вошли психологи и инструктора НВ УТЦ, представители АЭС. Анализировались действия кандидатов в стрессовых ситуациях: результаты обследований, экзаменов, аварийных тренировок на тренажере, профессиональной деятельности, а также характерные поведенческие особенности. Уровень стрессоустойчивости оценивался по 4-х бальной шкале: 4 - высокий уровень стрессоустойчивости, 3 - средний, 2 - низкий, 1 - очень низкий. Уровень стрессоустойчивости явился важнейшим показателем для рекомендации к оперативной деятельности (при уровне стрессоустойчивости выше 2 кандидат не рекомендовался к оперативной работе). Для исследования были отобраны 46 кандидатов (мужчины, Age - 32.50, S - 3.23), по которым были получены согласованные оценки по всем экспертам (16 человек имели высокий уровень стрессоустойчивости, 8 - средний, 14 - низкий и 8 - очень низкий). Для психофизиологической оценки уровня стрессоустойчивости были использованы результаты психологического тестирования по методике Шульте-Горбова и записи RR-интервалов в процессе выполнения третьего задания данного теста.

Используемые для описания HRG значения RR-интервалов предварительно округлялись до 10 мсек. [1]. При расчете циклических компонент графа были также учтены "шумовые" флуктуации значений RR-интервалов: начальные и конечные координаты циклической компоненты могли различаться между собой, но не более чем на 10 мсек. В данном исследовании использовались следующие показатели структуры графа сердечного ритма:

- ND – число узлов (вершин) графа.
- NRib – число ребер графа.
- $ND_S$  – число узлов на единицу дисперсии RR-интервалов ( $S_{RR}^2$ , мсек<sup>2</sup>):  $ND_S = ND/S_{RR}^2$  (плотность узлов графа в квадрате со стороной равной  $S_{RR}$ ).
- $NRib_S$  – плотность ребер графа в квадрате со стороной равной  $S_{RR}$ .
- SumF – сумма накопленных частот по всем рангам циклических компонент графа.
- $N_{RG}$  – число рангов циклических компонент, выделенных в графе.
- $M_F$  – среднее значение накопленных частот для графа:  $M_F = \text{SumF}/N_{RG}$ .
- $F_0$  - накопленная частота по циклическим компонентам нулевого ранга.
- $F_{VHF}$  – накопленная частота по циклическим компонентам в диапазоне 0.40-1.00 Гц, (0.40 Гц - стандартная правая граница высокочастотного диапазона спектральной плотности сердечного

ритма (HF); период циклической компоненты определяется числом ребер, входящих в компоненту).

- $F_{HF}$  – накопленная частота по циклическим компонентам в диапазоне 0.15-0.40 Гц (соответствует высокочастотному диапазону спектральной плотности сердечного ритма - HF);
- $F_{LF}$  – накопленная частота по циклическим компонентам в диапазоне 0.04-0.15 Гц (соответствует низкочастотному диапазону спектральной плотности сердечного ритма - LF);
- $F_{0n}$  – процент накопленной частоты по циклическим компонентам нулевого ранга от общей суммы накопленных частот по всему графу:  $F_{0n} = 100 \times F_0 / \text{SumF}$  (соответственно были рассчитаны нормированные показатели  $F_{VHF_n}$ ,  $F_{HF_n}$  и  $F_{LF_n}$ ).

Для коррекции границ частотных диапазонов (FD) по среднему RR-интервалу ( $RR_{cp}$ , сек.) использовалась формула:  $FD_{cor} = FD \times RR_{cp}$  [1].

## Обсуждение результатов

Выполнение факторного анализа требует, чтобы распределение каждого анализируемого количественного признака подчинялось нормальному закону. Поэтому первоначально была выполнена проверка гипотезы о нормальности распределения показателей ВСП с помощью критериев Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова (с поправкой Лиллиефорса). Для наших целей распределения показателей ВСП были преобразованы к нормальному (уровень значимости критериев  $p > 0.05$ ).

	<b>Фактор 1</b>	<b>Фактор 2</b>	<b>Фактор 3</b>
<b>ND</b>	-0.817592	0.388277	-0.356259
<b>lnND<sub>s</sub></b>	0.935246	0.025713	0.201984
<b>NRib</b>	-0.706555	0.615454	-0.251437
<b>lnNRib<sub>s</sub></b>	0.936082	-0.023672	0.253376
<b>F<sub>0</sub></b>	0.476621	-0.755724	0.208208
<b>F<sub>0n</sub></b>	0.238698	-0.805342	0.342745
<b>F<sub>VHF</sub></b>	0.531635	-0.762330	0.240843
<b>F<sub>VHF<sub>n</sub></sub></b>	0.309989	-0.809232	0.419140
<b>F<sub>HF</sub></b>	0.212980	0.887636	0.243781
<b>F<sub>HF<sub>n</sub></sub></b>	-0.112956	0.949966	0.049965
<b>F<sub>LF</sub></b>	-0.288857	0.094675	-0.921344
<b>F<sub>LF<sub>n</sub></sub></b>	-0.411667	0.077195	-0.891166
<b>lnSumF</b>	0.741842	-0.499893	0.371566
<b>lnM<sub>F</sub></b>	0.729513	-0.460107	0.385028
<b>Общая дисперсия</b>	4.975031	5.153311	2.680932
<b>Доля общей дисперсии</b>	0.355359	0.368094	0.191495

**Таблица 1.** Факторные нагрузки на показатели структуры HRG (метод главных компонент, вращение по принципу Varimax normalized).

С помощью метода главных компонент были выделены три фактора (главные компоненты) с суммарным накопленным вкладом в дисперсию признаков 91.50%. Для облегчения содержательной интерпретации выделенных факторов предварительно была выполнена процедура вращения главных компонент по принципу Varimax normalized. В табл. 1 представлены факторные нагрузки на показатели структуры HRG после процедуры вращения ( $\ln$  - натуральный логарифм показателя).

Согласно полученным данным, первый фактор ( $\Phi.1$ ) имеет положительную корреляцию с показателями плотности узлов и ребер графа, с суммарной и средней частотой циклических компонент и отрицательную корреляцию с числом узлов и ребер. Ранее мы пришли к выводу [1], что показатель ND может служить мерой энтропии (неопределенности, хаотичности) HRG, и чем выше психическое напряжение организма, тем меньше энтропия, хаотическая динамика сердечного ритма. В состоянии расслабления энтропия HRG наоборот возрастает. Также было показано, что плотность узлов графа имеет отрицательную корреляцию с мощностью спектра в VLF-диапазоне и может быть связана с уровнем активности корково-лимбических структур мозга [1, 19]. При росте невротического возбуждения показатель  $ND_s$  снижается. Суммируя выше сказанное,  $\Phi.1$  можно интерпретировать как степень психического напряжения, обусловленного, в первую очередь, уровнем невротического возбуждения (активностью корково-лимбических структур мозга).

Второй фактор ( $\Phi.2$ ) имеет положительную корреляцию с показателями накопленной частоты по циклическим компонентам в HF-диапазоне и отрицательную в VHF-диапазоне (включая показатели  $F_0$ ). Результаты исследований по спектральному анализу HRV установили, что эфферентная вагусная активность является важной составляющей вариабельности в HF-диапазоне [12, 13, 14, 15]. По мнению многих исследователей, дыхательная компонента HF-диапазона спектра (синусовая дыхательная аритмия) несомненно свидетельствует о парасимпатической активности [16, 17, 18]. Показатель накопленной частоты циклических компонент HRG в VHF-диапазоне требует дополнительных пояснений. В этот диапазон попадают компоненты двух рангов: нулевого ( $F_0$ ) и второго (циклические компоненты первого ранга в HRG отсутствуют). Компоненты нулевого ранга имеют только два узла с одинаковыми координатами (исходный ряд RR-интервалов содержит последовательность из трех равных RR). Компоненты второго ранга (частота колебаний 0.5 Гц) состоят из трех узлов (начальный и конечный совпадают) и двух ребер (исходный ряд содержит последовательность из 4 RR-интервалов с двумя чередующимися значениями). Рост частоты циклических компонент в VHF-диапазоне (как и показателя  $F_0$ ) отражает процесс стабилизации сердечного ритма: снижение колебаний в более низких диапазонах частот и, в первую очередь, в HF-диапазоне [1]. Таким образом, второй фактор

можно интерпретировать как степень снижения стабилизации сердечного ритма, обусловленный ростом активности вагуса (синусовой дыхательной аритмии).

Для третьего фактора (Ф.3) характерны высокие отрицательные нагрузки на показатели накопленной частоты по циклическим компонентам в LF-диапазоне. Для интерпретации этого фактора обратимся к внушительному количеству исследований по спектральному анализу, которые продемонстрировали уменьшение HRV с повышением сложности выполняемой психической задачи и ростом умственных усилий [2, 3, 4, 5, 6]. Ряд исследователей полагают, что HRV в LF-диапазоне служит наиболее адекватным индексом концентрации субъектом умственных усилий на решении задачи [7, 8, 9, 10, 11]. Поскольку показатели  $F_{LF}$  и  $F_{LFn}$  отражают вариабельность сердечного ритма в LF-диапазоне, Ф.3 можно интерпретировать как уровень концентрации умственных усилий на задаче.

На следующем шаге мы воспользовались факторными оценками массива наблюдений для расчета соответствующих регрессионных уравнений. В регрессионное уравнение Ф.1 вошли показатели ND и  $ND_S$  ( $R = 0.9439$ ,  $F = 41015.96$ ,  $p = 0.000$ ), Ф.2 -  $F_{VHF_n}$ ,  $F_{HF}$  и  $F_{VHF_n}$  ( $R = 0.9974$ ,  $F = 650638.8$ ,  $p = 0.000$ ), Ф.3 -  $F_{LF}$  и  $F_{LFn}$  ( $R = 0.9569$ ,  $F = 54487.07$ ,  $p = 0.000$ ). Полученные регрессионные уравнения позволили рассчитать значения факторных показателей структуры HRG по 4-м функциональным группам: норма, психическое напряжение, возбуждение и утомление. Согласно результатам наших обследований, рост напряжения регуляторных систем при выполнении сложных психологических тестов сопровождается снижением колебаний ритма как в LF, так и в HF-диапазонах (выраженная стабилизация ритма) и уменьшением длительности RR-интервалов. Поэтому дополнительно был рассчитан интегральный показатель напряжения регуляторных систем (Фактор S) по формуле: Фактор S = (Ф.3–Ф.2)/RR<sub>ср</sub>.

Группа	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор S
1	-0.29996	0.70857	-0.563977	-1.37827
2	1.74028	-1.57944	0.877834	4.94731
3	-1.53515	-0.60437	0.227104	1.25415
4	1.40821	1.74930	0.741254	-1.07557

**Таблица 2.** Средние значения по факторным показателям структуры HRG для групп с различными функциональными состояниями: 1 - норма, 2 - психическое напряжение, 3 - невротическое возбуждение, 4 - утомление.

В таблице 2 представлены средние значения по факторам показателей структуры HRG для 4-х функциональных групп. Наименьшие значения для Ф.3 (уровень концентрации психических усилий) получены, как и ожидалось, в группе 1 (норма), а максимальные - в группе 2 (психическое напряжение). Значение критерия Стьюдента для независимых групп ( $t = -32.5557$ ,  $p=0.000$ ). Отметим высокие значение по Ф.3 для состояния утомления ( $t$ -критерий для 1 и 4 группы равен  $-33.6785$ ,  $p=0.000$ ), что указывает на снижение колебаний сердечного ритма в LF-диапазоне, характерное для концентрации психических усилий. Но значения по Ф.2 позволяют разграничить состояние утомления от психического напряжения. Если при выполнении сложной психологической задачи колебания в HF-диапазоне резко снижаются (выраженная стабилизация ритма), то при утомлении доля синусовой дыхательной аритмии (активность вагуса), напротив, возрастает ( $t$ -критерий для 2 и 4 группы равен  $-82.0044$ ,  $p=0.000$ ). Любопытно, что в состоянии утомления средние значения по Ф.2 выше, чем в норме. Это обусловлено значительным относительным ростом колебаний в HF-диапазоне на фоне общей стабилизации ритма (снижения LF-показателей) в состоянии утомления (сохранение лишь вагусной активности). Таким образом, можно предположить, что при снижении функциональных резервов в первую очередь уменьшается частота циклических компонент графа в LF-диапазоне (парадоксальная картина, характерная для концентрации психических усилий) и возрастает относительная доля HF-колебаний в общей вариабельности HRG. Эта парадоксальность сохраняется и при оценке степени энтропии (хаотичности) HRG по средним значениям первого фактора: низкие значения (процесс стабилизации ритма, снижения энтропии) характерны как для состояния психического напряжения, так и для утомления. Наивысшие значения по Ф.1 (степень психического напряжения, обусловленного уровнем невротического возбуждения) для третьей группы свидетельствуют в пользу правильности интерпретации этого фактора. Значение  $t$ -критерия для 1 и 3 группы =  $-45.1655$  ( $p=0.000$ ). Важные результаты получены по интегральному показателю напряжения регуляторных систем (Фактор S). Наибольшие значения по этому показателю имеет вторая группа, наименьшие - первая ( $t$ -критерий для 1 и 2 группы равен  $-129.248$ ,  $p=0.000$ ). Значимые различия обнаружены и для 2 и 4 групп ( $t$ -критерий для 2 и 4 группы равен  $96.7866$ ,  $p=0.000$ ). Это обусловлено высокой долей синусовой дыхательной аритмии в состоянии функционального утомления. Значимые различия отмечены и для 1 и 3 групп ( $t$ -критерий для 1 и 3 группы равен  $-63.4520$ ,  $p=0.000$ ), что объясняется снижением при невротическом возбуждении (напряжении) колебательных процессов как в HF, так и в LF-диапазонах, сокращением RR-интервалов и ростом показателя  $ND_S$  (колебаний в VLF-диапазоне). Таким образом, невротическое возбуждение характеризуется не только ростом эмоциональной лабильности, но и возрастанием напряжения регуляторных систем.

На следующем шаге был выполнен дискриминантный анализ для 4-х функциональных групп на основе значений факторных показателей структуры HRG (Wilks' Lambda = 0.02354, F = 2276.4,  $p < 0.000$ ). Для всех групп была получена высокая точность классификации на основе дискриминантных функций: первая группа - 91.27%, вторая - 96.89%, третья - 97.34%, четвертая - 96.15% (общий процент правильной классификации по четырем группам - 95.23%). Таким образом, факторные показатели структуры HRG позволяют не только с высокой точностью классифицировать представленные функциональные состояния, но и содержательно их характеризовать.

Результаты дифференциальной диагностики различных функциональных состояний позволили перейти к использованию факторных показателей структуры HRG для оценки уровня стрессоустойчивости у кандидатов в оперативный персонал. Но прежде остановимся на содержательном определении понятия стрессоустойчивости. В оперативной деятельности можно выделить объективные и субъективные факторы сложности задачи. К первым относятся такие факторы, как объем контролируемой информации, количество органов регулирования и управления, сложность и время принятия решения, сложность алгоритмов управления в различных режимах работы оборудования. К субъективным факторам сложности задачи можно отнести недостаточный уровень профессиональной подготовки, отсутствие опыта работы, высокую значимость для субъекта ошибочных действий и результатов выполнения (мотивация), недостаточный уровень высших психических функций, негативное функциональное состояние, повышенную эмоциональную лабильность и сензитивность. В данном исследовании под стрессоустойчивостью понималась способность субъекта сохранять требуемую эффективность действий в ситуации роста как объективных, так и субъективных факторов сложности задачи.

В 1986 году Дж. Малдер провел различия между двумя типами умственных усилий [20]: первый обусловлен уровнем сложности задачи, второй - функциональным состоянием. Согласно Дж. Малдеру, такие условия, как ограничение времени на решение задачи, порождают неоптимальное функциональное состояние, которое, в свою очередь, ведет к снижению эффективности деятельности. Для компенсации этих негативных процессов от субъекта требуются дополнительные усилия. В нашем понимании, умственные усилия порождаются объективными и субъективными факторами сложности задачи. Так, ограничение времени для решения задачи (объективный фактор) потребует от обследуемого дополнительных усилий. При этом степень этих усилий будет тем выше, чем меньше готов субъект работать в таких условиях (скажется субъективный фактор: уровень подготовки, мотивации, уровень высших психических функций и т.д.). Например, опосредованность роста умственных усилий при возрастании сложности задачи уровнем мотивации обследуемого была установлена в работе [21]. В других исследованиях было обнаружено, что с ростом сложности задачи, когда ее требования превышали возможности



обследуемого, снижалась эффективность действий и возрастала HRV (уровень концентрации умственных усилий падал) [22, 23].

Для психофизиологической оценки уровня стрессоустойчивости мы воспользовались компьютерным вариантом теста Шульте-Горбова, который включал в себя три задания. Данный тест имеет средний уровень сложности по объективным факторам и значительный разброс по субъективным. Сложность по субъективным факторам определялась, в первую очередь, индивидуальным уровнем эмоциональной лабильности и сензитивности при выполнении тестовых заданий, имеющих высокую значимость для кандидатов. Непосредственно в ходе выполнения заданий теста обследуемые получали обратную связь. При совершении грубых ошибок программа останавливалась, и задание выполнялось с первого шага. Количество повторных выполнений было ограничено. Программа контролировала все неточные действия и словно подстегивала рост субъективных факторов сложности, "карая" повторными выполнениями за ошибки. Необходимо отметить, что все обследуемые имели достаточные навыки работы на ЭВМ.

SL	Ф.1	Ф.2	Ф.3	Ф.S	ТЗ	Нпр	Нцв	Нпос
4	0.8632	-1.2010	0.7788	3.2103	255.94	1.5625	0.8125	0.2500
3	0.6917	-1.2246	0.8320	3.6471	237.88	1.3750	1.0000	0.1250
2	0.0808	-0.7938	0.4536	2.2055	331.29	1.8571	1.2857	0.7857
1	-0.8789	-0.8285	0.6332	2.1562	390.13	2.1250	1.8750	1.0000

**Таблица 3.** Средние значения факторных показателей структуры HRG и результатов выполнения третьего задания теста Шульте-Горбова (ТЗ - время выполнения, Нпр - количество проб, Нцв - количество ошибок на цвет, Нпос - количество ошибок на последовательность) для различного уровня стрессоустойчивости (SL).

В таблице 3 представлены средние значения факторных показателей структуры HRG и результатов выполнения третьего задания теста Шульте-Горбова для различных уровней стрессоустойчивости (экспертные оценки). Показательны результаты по фактору степени психического напряжения, обусловленного уровнем невротического возбуждения (Ф.1). По мере снижения уровня стрессоустойчивости (SL) уровень невротического возбуждения значительно возрастает (t-критерий для 4 и 1 уровня SL равен -4.34536,  $p=0.00044$ ). Для низкой стрессоустойчивости характерно также снижение уровня концентрации психических усилий (Ф.1) и повышение доли синусовой дыхательной аритмии (Ф.2). Показатели эффективности выполнения тестового задания при снижении SL ухудшаются: возрастает среднее время выполнения (t-

критерий для 4 и 1 уровня SL равен  $-2.18428$ ,  $p=0.0399$ ), повышается число ошибок в цвете ( $t$ -критерий для 4 и 1 уровня SL равен  $-1.74877$ ,  $p=0.0942$ ). Такая же динамика характерна для количества дополнительных попыток и ошибок в последовательности.

Методом множественной линейной регрессии было получено уравнение уровня стрессоустойчивости ( $R = 0.8789$ ,  $F = 9.8476$ ,  $p = 0.000$ ), в которое наряду с  $RR_{ср}$  вошли как факторные показатели структуры HRG ( $\Phi.1$ ,  $\Phi.2$ ,  $\Phi.3$ ), так и результаты выполнения теста (время выполнения, количество ошибок). Снижение уровня концентрации психических усилий на задаче ( $\Phi.1$ ), рост показателей синусовой дыхательной аритмии ( $\Phi.2$ ), повышение степени психического напряжения, обусловленного уровнем невротического возбуждения ( $\Phi.3$ ), в совокупности с ростом ошибок и времени выполнения тестовых заданий характеризует низкий уровень стрессоустойчивости. Используя дискриминантный анализ для оценки уровня стрессоустойчивости ( $Wilks' \text{ Lambda} = 0.08528$ ,  $F = 3.4992$ ,  $p < 0.000$ ), были рассчитаны критерии чувствительности ( $Se$ ) и специфичности ( $Sp$ ) отнесения к группам "оперативник" (уровень стрессоустойчивости 3-4) и "неоперативник" (уровень стрессоустойчивости 1-2) на основе значений факторов показателей структуры HRG и эффективности выполнения тестовых заданий [24]:  $Se = 1.00$ ,  $Sp = 0.95$ .

## Заключение

- Методом факторного анализа показателей структуры HRG были выделены три фактора. Первый фактор включил в себя показатели variability графа сердечного ритма в LF-диапазоне и был интерпретирован как уровень концентрации умственных усилий на задаче. Второй фактор объединил показатели variability графа сердечного ритма в HF и в VHF-диапазонах и содержательно отражает уровень синусовой дыхательной аритмии (вагусная активность). В третий фактор вошли показатели числа узлов графа и их плотности на единицу дисперсии, которые характеризуют степень психического напряжения, обусловленного уровнем невротического возбуждения (активностью корково-лимбических структур мозга). Дополнительно был рассчитан интегральный показатель напряжения регуляторных систем, который учитывал variability графа сердечного ритма как в LF, так и в HF-диапазонах, а также среднее значение длительности RR-интервалов.

- Для каждого фактора методом множественной линейной регрессии были получены соответствующие расчетные формулы, которые были использованы для дифференциальной диагностики ряда функциональных состояний (психическое напряжение, невротическое возбуждение, утомление) с помощью дискриминантного анализа. Анализ показал, что для состояния психического напряжения характерно выраженное снижение колебательных процессов как в LF (повышение концентрации психических усилий), так и в HF-диапазонах (снижение

синусовой дыхательной аритмии, тонуса вагуса), а также падение энтропии (хаотичности) HRG и общее высокое напряжение регуляторных систем. При невротическом возбуждении наблюдается рост эмоциональной лабильности на фоне напряжения регуляторных систем. В состоянии утомления отмечается парадоксальное снижение колебательных процессов в LF-диапазоне (характерное для роста концентрации психических усилий) и значительное возрастание относительной доли синусовой дыхательной аритмии на фоне уменьшения общей энтропии HRG. Результаты дискриминантного анализа продемонстрировали высокую точность классификации рассмотренных функциональных состояний при использовании значений факторов показателей структуры HRG.

- Уравнения для факторных показателей структуры HRG были использованы для оценки уровня стрессоустойчивости и отбора кандидатов на оперативные должности. Методом множественной линейной регрессии было построено уравнение регрессии и отобраны переменные, которые позволяют с высокой достоверностью оценить уровень стрессоустойчивости по значениям факторных показателей структуры HRG и результатам эффективности деятельности в процессе тестовых заданий. Было установлено, что для низкого уровня стрессоустойчивости характерно снижение уровня концентрации психических усилий на задаче, рост показателей синусовой дыхательной аритмии, повышение степени психического напряжения, обусловленного уровнем невротического возбуждения, а также рост ошибок и времени выполнения тестовых заданий. В нашем исследовании основной вклад в сложность задачи определялся такими субъективными факторами, как эмоциональная лабильность и сензитивность в процессе выполнения. С помощью дискриминантного анализа для оценки уровня стрессоустойчивости были получены высокие значения по критериям чувствительности (Se) и специфичности (Sp) отнесения к группам "оперативник" и "неоперативник" на основе значений факторных показателей структуры HRG и эффективности выполнения тестовых заданий.

- Результаты факторного анализа доказывают перспективность применения показателей структуры HRG для дифференциальной диагностики ряда функциональных состояний и оценки уровня стрессоустойчивости кандидатов на оперативную должность.

## Список литературы

1. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ variability сердечного ритма с помощью метода графа при различных функциональных состояниях. // Вопросы психологии, № 2, 2002.
2. Kramer A.F. Physiological metrics of mental workload: A review of recent progress. // In D.L.Damos (Ed.) Multiple-Task performance, 1991, pp. 279-328.

3. Jorna P.G.A.M. Spectral analysis of heart rate and psychological state: A review of its validity as a workload index. // *Biological Psychology*, 1992, 34, pp. 237-257.
4. Wilson G.F. Air-to-Ground training missions: A psychophysiological workload analysis. // *Ergonomics*, 1993, 36, pp. 1071-1087.
5. Wierwille W.W., Eggemeier F.T. Recommendations for mental workload measurement in a test and evaluation environment. // *Human Factors*, 1993, 35(2), pp. 263-281.
6. Tattersall A., Hockey G. Level of operator control and changes in heart rate variability during simulated flight maintenance. // *Human Factors*, 1995, 37(4), pp. 682-698.
7. Jorna P.G.A.M., Mulder G. Mental load and the processing of information in the underwater environment. // In H.Ursin (Ed.) *Biological and psychological bases of psychosomatic*, 1983.
8. Jorna P.G.A.M. Heart rate parameters and the coping process underwater. // In J.F.Orlebeke, G.Mulder, L.J.P.Van Doorhen (Eds.) *Psychophysiology of cardiovascular control: methods, models and data*, 1985, pp. 827-839.
9. Porges S.W., Byrne E.A. Research methods for measurement of heart rate and respiration. // *Biological Psychology*, 1992, 34, pp. 93-130.
10. Fairclough S.H. Psychophysiological measures of workload and stress. // In A.M.Parkes, S.Franzen (Eds.) *Driving future vehicles*, 1993, pp. 207-216.
11. 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, 118, pp. 436-447.
12. Akselrod S., Gordon D., Ubel F.A., Shannon D.C., Barger A.C., Cohen R.J. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat to beat cardiovascular control. // *Science*, 1981, 213, pp. 220-222.
13. Pomeranz M., Macaulay R.J.B., Caudill M.A., Kutz I., Adam D., Gordon D., Kilborn K.M., Barger A.C., Shannon D.C., Cohen R.J., Benson M. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. // *Am. J. Physiology*, 1985, 248, pp. 151-153.
14. Malliani A., Pagani M., Lombardi F., Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. // *Circulation*, 1991, 84, pp. 1482-1492.
15. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standards of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use. // *Circulation*, 1996, 93, pp. 1043-1065.
16. Eckberg D.L. Human sinus arrhythmia as an index of vagal cardiac outflow. // *J. Appl. Physiology*, 1983, 54, pp. 961-966.
17. Fouad F.M., Tarazi R.C., Ferrario C.M., Fighaly S., Alicandri C. Assessment of parasympathetic control of heart rate by a noninvasive method. // *Am. J. Physiology*, 1984, 246, pp. 838-842.

18. Hayano J., Sakakibara Y., Yamada M., Mukai S., Fujinami T., Yokoyama K., Watanabe Y., Takata K. Accuracy of assessment of cardiac vagal tone by heart rate variability in normal subjects. // *Am. J. Cardiology*, 1991, 67, pp. 199-204.
19. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ variability ритма сердца при негативных функциональных состояниях в ходе сеансов психологической релаксации. // *Физиология человека*, 2000, том 26, № 4, с. 48-54.
20. Mulder G. The concept and measurement of mental effort. // In G.R.J.Hockey, A.W.K.Gaillard, M.G.H.Coles (Eds.) *Energetics and human information processing*, 1986, pp. 175-198.
21. Vicente K.J., Thornton D.C., Moray N. Spectral analysis of sinus arrhythmia: A measure of mental effort. // *Human Factors*, 1987, 29(2), pp. 171-182.
22. Aashman J., Mulder G., Mulder L.J.M. Operator effort and the measurement of heart rate variability. // *Human Factors*, 1987, 29, pp. 161-170.
23. Tulga M.K., Sheridan T.B. Dynamic decision and workload in multitask supervisory control. // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1980, 10, pp. 217-232.
24. Власов В.В. Эффективность диагностических исследований. М.: Медицина, 1988, 254 с.