

**Трехфакторная модель вариабельности сердечного ритма. Часть 1:
Исследование психических нагрузок при моделировании
операторской деятельности.
В.А. Машин**

Нововоронежский учебно-тренировочный центр подготовки специалистов для АЭС,
396070 Россия, г. Нововоронеж, Воронежская обл., НВУТЦ АТЭ, промзона.
E-mail: utc@vmail.ru

С помощью факторной модели вариабельности сердечного ритма (ВСР) был проанализирован характер изменений функциональных состояний и показателей ВСР 84 здоровых обследуемых при различных уровнях психической рабочей нагрузки. Психическая нагрузка моделировалась с помощью заданий методики Шульте-Горбова на двух уровнях: умеренная и высокая. Исходный уровень регистрировался перед началом выполнения заданий. Были получены статистически значимые различия частоты диагностирования функциональных состояний между всеми уровнями психической нагрузки. Согласно динамике функциональных состояний при различных уровнях психической нагрузки были выделены две группы с преобладанием процессов эмоционального возбуждения (12 человек) и когнитивного напряжения (25 человек). Для данных групп был выполнен сравнительный анализ динамики показателей ВСР (временных, частотных и графа сердечного ритма). Были получены высокие статистически значимые различия между группами на каждом уровне психической нагрузки. Анализ отдельных показателей ВСР в каждой группе позволил определить показатели, чувствительные к различным уровням психической нагрузки. Подчеркивается важность учета процессов возбуждения при анализе психической нагрузки, трехфакторная модель ВСР предложена для различения процессов монотонии и утомления.

Ключевые слова: психическая рабочая нагрузка, психическое напряжение, вариабельность сердечного ритма, факторная модель, функциональные состояния.

**Three-factor model of heart rate variability. Part I:
Analysis of mental workload in simulated operator activity.
V.A.Mashin**

Novovoronezh Training Centre,
396072 Russia, Novovoronezh, Voronezh region, NV TC. E-mail: utc@vmail.ru

By factor model of heart rate variability (HRV) is explored the functional states dynamics and HRV indexes of 84 healthy subjects under different mental workload levels. The levels of mental workload were assigned tasks of the Shulte-Gorbov test (moderate and high levels). Baseline recording were conducted before test. Statistically significant differences of functional states frequencies for all mental workload levels were found. According to the functional states dynamics under different mental workload levels the two groups were extracted: (1) - with dominance of emotional arousal states (12 subjects), (2) - with dominance of cognitive strain states (25 subjects). The comparative analysis of HRV indexes dynamics (time, frequency domains and heart rate graph) was made. High statistically significant differences between groups on every mental workload levels were received. Analysis of HRV indexes for every groups has allowed to define the indexes sensitive to different mental workload levels. The importance of the control of arousal states at analysis of mental workload was underlining. The three-factor model of HRV for distinguishing of monotonia and fatigue was offered.

Key words: mental workload, mental strain, heart rate variability, factor model, functional states.

Современный уровень развития сложных промышленных систем требует контроля не только состояния автоматики, оборудования и технологического процесса, но и функционального состояния операторов для обеспечения надежности и эффективности систем управления [Alexandersson E., 2003; Hobbs A., Williamson A., 2003; Isaac A. et al, 2003; Kumar U., Malik H., 2003; Leveson N., 2004]. Общая тенденция роста доли человеческого фактора в возникновении внештатных ситуаций при управлении сложными технологическими процессами заставила обратить внимание специалистов по инженерной психологии и эргономике на проблему оценки и контроля психических нагрузок, которые испытывает оператор в процессе своей деятельности. Состояние монотонии, когда доля автоматики в управлении высока, а уровень психической нагрузки низкий, состояние перенапряжения, когда чрезмерная психическая нагрузка не компенсируется уровнем автоматики, являются реальными источниками снижения эффективности и надежности деятельности оператора. Психическая нагрузка является важным фактором эргономических исследований деятельности пилотов, авиадиспетчеров, водителей при взаимодействии с автоматизированными системами управления, при создании адаптивной автоматики [DeSenti C.T. et al., 2001; Dussault C. et al., 2004; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003].

Связь уровня психического напряжения оператора с эффективностью и надежностью выполнения деятельности потребовала создания эффективных и надежных методов и критериев для оценки и контроля функционального состояния человека в процессе выполнения им профессиональных задач. Данная идея легла в основу разработки адаптивных автоматизированных систем, в которых информация о психическом напряжении человека оперативно используется для управления уровнем психической нагрузки. При значимо высоких уровнях психического напряжения часть функций оператора берет на себя автоматика, при значимом снижении активности оператора (включенности его в задачу) автоматика возвращает часть функций управления человеку [Byrne E.A., Parasuraman R., 1996; Kramer A.F., 1991; Schmidt G., Monfill G.E., 1995; Tattersall A.J., Hockey G.R., 1995].

В последние десятилетия значительный интерес исследователей прикован к показателям вариабельности сердечного ритма (ВСР) как индикаторам психической нагрузки при выполнении индивидуумами моделируемых или реальных задач [Balkin T. et al, 2004; Fahrenberg J., Wientjes C.J.E., 2000; Farmer E., Brownson A., 2003; Monitoring metabolic status, 2004; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Scerbo M.W. et al., 2001; Wilson G.F., 2001]. С помощью трехфакторной модели ВСР [Машин В.А., Машина М.Н., 2002; Машин В.А., Машина М.Н., 2004] мы проанализировали индивидуальную динамику показателей ВСР при воздействии различных уровней психической нагрузки и роль гетерогенности для объяснения влияния

рабочей нагрузки на показатели ВСП. Дополнительно мы оценили чувствительность отдельных показателей ВСП к воздействию различных уровней психической нагрузки с учетом разработанной нами классификации функциональных состояний [Машин В.А., Машина М.Н., 2002; Машин В.А., Машина М.Н., 2004].

В эксперименте приняли участие 84 кандидата на оперативные должности АЭС, которые проходили профессиональный отбор в лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра подготовки специалистов для АЭС (ЛПФО НВУТЦ). У всех кандидатов (средний возраст = 31.47 лет, SD = 6.62 лет) отсутствовали клинические формы нарушения здоровья.

Экспериментальная программа включала в себя регистрацию сердечного ритма обследуемых перед началом выполнения заданий (исходный уровень, положение "сидя в кресле", длительность 10 минут), и в процессе психической нагрузки. Психическая нагрузка моделировалась с помощью заданий методики Шульте-Горбова "Черно-красная таблица" (компьютерный вариант). На экране дисплея в виде таблицы в случайном порядке располагались красные числа от 1 до 24 и черные от 1 до 25. Методика включала в себя три задания, первые два из которых имели объективно одинаковые требования к восприятию, оперативной памяти и вниманию исполнителя. В первом задании от обследуемых требовалось найти и указать (с помощью "мыши") все числа красного ряда от 1 до 24, а во втором - все числа черного ряда от 25 до 1. Субъекты контролировали цвет и последовательность числового ряда. С помощью первых двух заданий методики Шульте-Горбова моделировался умеренный уровень психической нагрузки. Третье задание представляло собой одновременное (параллельное) выполнение двух задач: необходимо выбрать все числа черного ряда от 25 до 1 (в убывающем порядке) и все числа красного ряда от 1 до 24 (в возрастающем порядке), чередуя числа из черного и красного ряда. Содержание третьего задания отражало более высокие требования к оперативной памяти и вниманию исполнителя, от которого требовалось одновременно контролировать цвет и последовательность двух числовых рядов, имеющих противоположную направленность. С помощью третьего задания методики Шульте-Горбова моделировался высокий уровень психической нагрузки. В каждом задании автоматически осуществлялся контроль допущенных обследуемым ошибок (максимум четыре на одну попытку) и выполненных попыток (максимум 3 на одно задание). Все кандидаты хорошо владели ЭВМ и не испытывали проблем с манипулированием компьютерной "мышью". По результатам выполнения трех заданий методики Шульте-Горбова для каждого обследуемого были получены объективные показатели деятельности: T_i - время выполнения задания, NC_i - количество

ошибок на цвет, NS_i - количество ошибок на последовательность, NT_i - количество попыток (i – номер задания).

Для анализа ВСП методами временной области рассчитывались следующие статистические показатели: M (средний R-R интервал), $SDNN$ (среднее квадратическое отклонение R-R интервалов), $RMSSD$ (квадратный корень из среднего значения квадратов разностей величин последовательных R-R интервалов). Методами частотной области рассчитывались спектральные показатели ВСП: мощность спектральной плотности (в мсек^2) в высокочастотном (HF, 0.15-0.4 Гц) и низкочастотном (LF, 0.04-0.15 Гц) диапазонах. Из показателей графа сердечного ритма в анализ были включены: ND (число узлов графа), $NRib$ (число ребер графа), b_1 (тангенс угла наклона линии регрессии графа), F_0 (накопленная частота по первому рангу циклических компонент графа). Нормирование показателей факторной структуры ($SDNN_n$, b_{1n} , M_n) выполнялось по данным референтной группы (848 здоровых мужчины, средний возраст = 29.73 лет, $SD = 6.43$ лет). Согласно трехфакторной модели ВСП классифицировались следующие функциональные классы: ФК1 - "Норма", ФК2 - "Норма с преобладанием симпатической активности", ФК3 - "Эмоциональное возбуждение", ФК4 - "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности", ФК5 - "Психическое напряжение", ФК6 - "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса", ФК7 - "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур", ФК8 - "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур".

По результатам тестирования из 84 кандидатов 7 человек не смогли выполнить наиболее сложное третье задание методики Шульте-Горбова даже с третьей попытки (напомним, что максимальное число попыток на каждое задание - 3). В табл. 1 представлены результаты успешного выполнения всех заданий методики 77 обследуемыми. Поскольку распределения результатов выполнения заданий не отвечали требованию нормальности, мы воспользовались непараметрическим T-критерием Вилкоксона (зависимые выборки) для их сравнения. Согласно T-критерию Вилкоксона показатели выполнения первых двух заданий не имели статистически значимых различий ($p_T < 0.520$, $p_{NC} < 0.809$, $p_{NS} < 0.859$, $p_{NT} < 1.000$, соответственно, время выполнения задания - T, количество ошибок на цвет - NC, количество ошибок на последовательность - NS и количество попыток - NT). Это подтверждает наше исходное предположение о равенстве уровня психической нагрузки для первых двух заданий.

В тоже время, результаты выполнения третьего задания указывают на значимый рост объективной трудности задачи, который не связан с простым увеличением длины ряда чисел для поиска (в этом случае время выполнения третьего задания было бы приблизительно равно удвоенному времени выполнения первых двух заданий). Этот рост отражает сложные

процессы переключения и распределения внимания (и связанные с этим процессы восприятия и памяти) между двумя параллельными задачами. Для доказательства мы разделили показатели времени выполнения третьего задания на два, а затем сравнили их с результатами первых двух заданий. В итоге и для первого и для второго задания по Т-критерию Вилкоксона были получены статистически значимые различия с третьим заданием по времени выполнения ($p < 0.01$).

Таблица 1.

Средние значения показателей выполнения заданий методики Шульте-Горбова (в скобках указаны их стандартные отклонения): Т - время выполнения задания, NC - количество ошибок на цвет, NS - количество ошибок на последовательность, NT - количество попыток.

Показатели	Задание 1	Задание 2	Задание 3
Т	57.75 (18.17)	58.44 (14.84)	198.04 (43.92)
NC	0.085 (0.447)	0.081 (0.412)	0.584 (0.965)
NS	0.060 (0.302)	0.068 (0.314)	0.436 (1.045)
NT	1.034 (0.182)	1.034 (0.225)	1.545 (0.699)

Таблица 2.

Частота (в скобках указаны проценты) диагностирования функциональных классов (ФК) на различных стадиях эксперимента (при различных уровнях психической нагрузки).

Стадии	ФК1	ФК2	ФК3	ФК4	ФК5	ФК6	ФК7	ФК8
Исходный уровень	7 (8.33)	2 (2.38)	18 (21.43)	26 (30.95)	24 (28.57)	2 (2.38)	1 (1.19)	4 (4.76)
Задание 1	7 (8.33)	5 (5.95)	9 (10.71)	18 (21.43)	31 (36.90)	2 (2.38)	8 (9.52)	4 (4.76)
Задание 2	11 (13.10)	5 (5.95)	10 (11.90)	11 (13.10)	35 (41.67)	4 (4.76)	6 (7.14)	2 (2.38)
Задание 3	4 (4.76)	3 (3.57)	13 (15.48)	19 (22.62)	38 (45.24)	2 (2.38)	5 (5.95)	0 (0.00)

На следующем шаге с помощью критерия Пирсона (χ^2) было проверено согласие между частотой диагностируемых классов функциональных состояний (см. табл. 2) при раз-

личных уровнях психической нагрузки: 0 – исходный уровень, 1 – первое задание, 2 – второе задание, 3 – третье задание методики Шульте-Горбова. Предварительно для каждого условия (уровня психической нагрузки) были объединены данные по ячейкам с частотой менее 5 [Ллойд Э. и др., 1989]: ФК2, ФК6, ФК7 и ФК8. Значения критерия согласия при сравнении частот классов функциональных состояний, диагностированных при выполнении всех трех заданий, с исходным уровнем указывают на статистически значимые различия между ними ($p < 0.0001$): соответственно, $\chi_{01}^2 = 41.41$, $\chi_{02}^2 = 45.81$, $\chi_{03}^2 = 26.14$. Статистически значимые различия были получены при сравнении частот классов функциональных состояний, диагностированных при выполнении третьего задания (высокий уровень психической нагрузки), с частотами классов функциональных состояний, диагностированных при выполнении первого и второго заданий (умеренный уровень психической нагрузки): $\chi_{13}^2 = 12.92$ ($p < 0.012$), $\chi_{23}^2 = 21.45$ ($p < 0.0003$). В тоже время, сравнение частот классов функциональных состояний, диагностированных при выполнении первого и второго заданий (уровень психической нагрузки одинаков), позволяет сделать вывод в пользу статистически значимого согласия между ними: $\chi_{12}^2 = 6.70$ ($p < 0.158$).

Остановимся на содержательной интерпретации полученных различий в диагностике классов функциональных состояний на различных стадиях эксперимента (см. табл. 2). Исходное состояние (перед началом выполнения тестовой методики) характеризовалось значительной частотой диагностирования функциональных классов "Эмоциональное возбуждение" (21.43%) и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" (30.95%). Преобладание различных форм эмоционального возбуждения в исходном состоянии объясняется тревожно-эмоциональными реакциями в ситуации ожидания выполнения ответственных заданий. Неожиданно высокой оказалась частота диагностирования функционального класса "Психическое напряжение" (28.57%) в исходном состоянии.

С началом выполнения первого задания (умеренная психическая нагрузка) наблюдается снижение частоты диагностирования классов функциональных состояний связанных с эмоциональным возбуждением (32.14%, 27 обследуемых) и рост классов функциональных состояний связанных с психическим напряжением (ФК2, ФК5, ФК6, ФК7, ФК8: 59.52%, 50 обследуемых). Такая же картина сохраняется и при выполнении второго задания: соответственно, 26.19% (22 обследуемого) и 60.71% (51 обследуемый). Можно отметить во втором задании небольшой тренд в сторону повышения частоты диагностирования класса функциональных состояний "Норма" за счет снижения частоты диагностирования классов функциональных состояний, связанных с эмоциональным возбуждением (эффект психической адаптации к новым условиям). Но данная тенденция не достигает статистически значимого уровня.

ня. Переход к выполнению третьего задания, с высоким уровнем психической нагрузки, приводит к статистически значимому снижению частоты диагностирования функционального класса "Норма" (4.76%, 4 обследуемых), возрастанию частоты диагностирования функциональных классов, связанных с эмоциональным возбуждением (38.10%, 32 обследуемого) при сохранении частоты диагностирования функциональных классов, отражающих психическое напряжение (57.14%, 48 обследуемых). Этот рост частоты диагностирования функциональных классов, связанных с эмоциональным возбуждением, отражает тревожно-эмоциональные реакции на возросшую сложность задачи и вероятность совершения ошибок, на возросшее число допущенных при выполнении ошибок, на необходимость выполнения дополнительных попыток (конфликт с установкой на достижение положительного результата). Именно с этим заданием так и не смогли справиться 7 кандидатов, затратив на его выполнение все три отведенные инструкцией попытки.

Кроме общей динамики функциональных классов при воздействии различной психической нагрузки необходимо также отметить пеструю динамику диагностированных функциональных классов на уровне отдельных обследуемых. Например, различные формы эмоционального возбуждения на исходном уровне (высокие значения нормированных показателей $SDNN_n$ и b_{1n}) могут сменяться психическим напряжением при выполнении первого задания (снижение нормированных показателей M_n и $SDNN_n$), нормализацией состояния при выполнении второго задания (повышение нормированных показателей M_n и $SDNN_n$, снижение b_{1n}) и вновь эмоциональным возбуждением в третьем задании. Для некоторых было характерно устойчивое психическое напряжение или эмоциональное возбуждение при выполнении всех трех заданий. В целом, при переходе от исходного уровня к умеренной психической нагрузке (выполнение первого задания) наблюдались наиболее выраженные изменения: у 47 обследуемых (55.95%) отмечено изменение функциональных классов согласно трехфакторной модели ВСП. Это сопровождалось следующей динамикой нормированных показателей ВСП: повышением среднего R-R интервала (M_n) у 1.19% обследуемых и его понижением у 53.57%; повышением общей variability сердечного ритма ($SDNN_n$) у 5.95% и его снижением у 55.95%; снижением показателя b_{1n} у 42.86% и его повышением у 33.33%. В тоже время, при выполнении второго задания (сохраняется умеренный уровень психической нагрузки) изменения были наименее выраженные: только у 25 обследуемых (29.76%) была отмечена динамика диагностированных функциональных классов при сравнении с выполнением первого задания. Показатель M_n повысился у 21.42%, а снизился у 10.71%; показатель $SDNN_n$ возрос у 22.62% и понизился у 17.86%; индекс b_{1n} снизился у 23.81% и повысился у 25%. Наконец, при переходе от второго задания к третьему (высокий уровень психической

нагрузки) для 36 обследуемых (42.86%) была характерна динамика диагностированных функциональных классов со следующими изменениями нормированных показателей: показатель M_n повысился только у 2.38%, а снизился у 41.67%; показатель $SDNN_n$ возрос у 26.19% и понизился у 23.81%; индекс b_{1n} снизился у 14.29% и повысился у 42.86%.

В данном исследовании из 7 обследуемых, которые не смогли выполнить третье задание, у 2 (28.57%) были диагностированы функциональные состояния класса "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" (выраженное нервно-эмоциональное возбуждение), у 4 (57.14%) - "Психическое напряжение" (психическое перенапряжение) и у 1 (14.29%) – "Норма". В своих работах мы подробно останавливались на негативных последствиях таких функциональных состояниях, как эмоциональное перевозбуждение и психическое перенапряжение при выполнении оператором ответственной деятельности [Машин В.А., Машина М.Н., 2002; Машин В.А., Машина М.Н., 2004], поэтому отдельно рассмотрим последнего обследуемого, у которого неожиданно был диагностирован функциональный класс "Норма". Для него было характерно отсутствие мобилизации ресурсов организма при выполнении дополнительных попыток в третьем задании (обычно это сопровождается ростом напряжения: снижением M_n , $SDNN_n$ и повышением b_{1n}) и сохранение функционального класса "Норма" при выполнении всех трех заданий. Было выдвинуто предположение, что отсутствие роста психического напряжения при различных уровнях психической нагрузки (и неудачных попытках в третьем задании) может быть объяснено низким уровнем мотивации обследуемого (низкой значимостью для него результатов тестирования). Психологическая диагностика, которая включала в себя выполнение различных тестов, заполнение личностных опросников и проведение собеседования с обследуемым, подтвердила эту гипотезу. Как оказалось, оперативная деятельность, с ее высокой ответственностью и работой по сменам, мало его интересовала, как и результаты обследования. Заметим, что в своей практике профессионального отбора мы также констатировали низкую профессиональную мотивацию у субъекта, у которого на фоне низкой эффективности выполнения тестовых заданий диагностировался функциональный класс "Норма с преобладанием симпатической активности" (экономичная регуляция сердечного ритма при воздействии психической нагрузки).

Разнонаправленная динамика диагностированных функциональных классов при различных уровнях психической нагрузки не позволяла нам использовать для анализа чувствительности показателей ВСР данные по всей выборке, поскольку это могло привести лишь к оценке "средней температуры по больнице". Для этих целей мы остановились на двух основных диагностированных функциональных состояниях, связанных с процессами эмоционального возбуждения и психического напряжения. Для анализа динамики показателей ВСР бы-

ли сформированы две группы. В первую (12 человек, группа "А" – "Arousal") вошли обследуемые, у которых при выполнении всех трех заданий методики Шульте-Горбова диагностировались функциональные состояния, связанные с эмоциональным возбуждением (ФК3 и ФК4). Вторую (25 человек, группа "S" – "Strain") составили обследуемые, которые устойчиво характеризовались функциональным классом "Психическое напряжение" (ФК5) при выполнении всех трех заданий. Перед выполнением тестовых заданий (исходная стадия) в группе "А" у 9 обследуемых (75%) диагностировались различные формы эмоционального возбуждения (с преобладанием функционального класса "Эмоциональное возбуждение" – 7 человек), у 2 (17%) – "Норма" и 1 (8%) – "Норма с преобладанием симпатической активности". Для группы "S" на исходной стадии было характерно преобладание функционального класса "Психическое напряжения" (16 человек, 64%). У 8 обследуемых (32%) диагностировались различные формы эмоционального возбуждения (с доминированием функционального класса "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" – 7 человек) и 1 (4%) – "Норма с преобладанием симпатической активности". Из-за малого числа наблюдений для оценки нормальности распределения показателей ВСР по каждой группе использовался нормальный вероятностный график [Ллойд Э. и др., 1989]. Поскольку значения для всех показателей ВСР отклонялись от прямой линии графика, предположение о нормальности распределения было отклонено, и для статистического анализа были использованы непараметрические критерии.

Таблица 3.

Средние значения показателей ВСР (в скобках указаны их стандартные отклонения) для группы "А" ("эмоциональное возбуждение") и группы "S" ("психическое напряжение") при различных уровнях психической нагрузки.

ВСР	Исходный уровень		Задание 1		Задание 2		Задание 3	
	Гр. А	Гр. S						
M	814.40 (101.66)	649.94** (48.71)	723.98 (112.79)	588.83** (42.06)	743.12 (104.28)	591.38** (47.03)	700.43 (113.17)	560.62** (49.83)
SDNN	52.37 (20.64)	22.99** (8.90)	38.04 (9.96)	14.46** (4.66)	39.25 (12.82)	14.72** (5.26)	40.85 (12.67)	14.33** (4.95)
RMSSD	46.17 (20.74)	16.93** (7.81)	32.45 (10.09)	10.95** (3.92)	34.62 (11.08)	10.78** (3.99)	32.96 (11.13)	9.49** (3.42)

BCP	Исходный уровень		Задание 1		Задание 2		Задание 3	
	Гр. А	Гр. S	Гр. А	Гр. S	Гр. А	Гр. S	Гр. А	Гр. S
ND	29.06 (1.78)	21.21** (4.63)	27.62 (2.65)	16.89** (4.59)	28.26 (2.01)	16.92** (4.84)	27.40 (2.71)	15.80** (4.54)
NRib	30.99 (0.87)	25.50** (4.06)	30.13 (2.13)	22.17** (5.00)	30.83 (1.05)	22.01** (5.13)	30.11 (1.78)	20.23** (5.31)
F₀	1.58 (1.79)	10.92** (7.57)	3.14 (4.97)	15.77** (10.23)	1.86 (2.12)	16.55** (9.92)	3.18 (3.70)	22.61** (13.51)
b₁	0.571 (0.132)	0.692* (0.087)	0.611 (0.115)	0.686* (0.091)	0.597 (0.062)	0.695* (0.094)	0.654 (0.077)	0.740* (0.074)
LF	1636.61 (1437.92)	447.62** (327.94)	744.46 (394.78)	142.47** (93.02)	987.69 (959.90)	161.89** (116.48)	1028.36 (649.26)	172.69** (119.18)
HF	1121.79 (1057.56)	177.77** (172.61)	577.03 (271.64)	77.07** (56.58)	526.55 (363.89)	71.64** (59.03)	715.62 (480.98)	69.76** (42.64)

** - $p < 0.001$, * - $p < 0.01$: уровень значимости U – критерия Манна-Уитни для оценки различий между показателями групп при различных уровнях психической нагрузки.

В табл. 3 приведены значения показателей BCP для групп "А" и "S" при различных уровнях психической нагрузки. Достоверность различий между группами для каждого уровня психической нагрузки оценивалась с помощью непараметрического U – критерия Манна-Уитни для независимых выборок. Согласно данному критерию были получены высокие статистически значимые различия между группами "А" и "S" для каждого уровня психической нагрузки. В сравнении с группой "А" для группы "S" характерны более низкие значения показателей как для временной области BCP, так и для частотной. Для показателей графа сердечного ритма статистически более высокие значения в группе "S" были получены для F_0 и b_1 , и более низкие для ND и NRib. Дополнительно были проанализированы индексы относительных изменений (реактивности - FR) показателей BCP для групп "А" и "S" при росте уровня психической нагрузки, которые рассчитывались по формуле: $FR = 100 \times (F_2 - F_1) / F_1$, где F_1 – первоначальное значение, F_2 – конечное значение показателя. Достоверность различий полученных индексов между группами "А" и "S" оценивалась с помощью U – критерия Ман-

на-Уитни. Согласно данному критерию, отсутствовали статистически значимые различия в индексах относительных изменений показателей ВСП между группами "А" и "S" как при переходе от исходного уровня психической нагрузки к умеренному (выполнение первого задания), так и при переходе от умеренного уровня к высокому (от выполнения второго к третьему заданию).

Таблица 4.

Уровень значимости T – критерия Вилкоксона для оценки выраженности изменений показателей ВСП в группах "А" ("эмоциональное возбуждение") и "S" ("психическое напряжение") при различных уровнях психической нагрузки: ИУ – исходный уровень, 1, 2 и 3 – задания теста Шульте-Горбова.

ВСП	ИУ – 1		1 – 2		2 – 3	
	Группа А	Группа S	Группа А	Группа S	Группа А	Группа S
M	0.004**	0.000***	0.099	0.600	0.023*	0.000***
SDNN	0.005**	0.000***	0.695	0.861	0.583	0.778
RMSSD	0.008**	0.000***	0.182	0.757	0.638	0.074
ND	0.028*	0.001***	0.534	0.798	0.099	0.326
NRib	0.158	0.004**	0.213	0.882	0.060	0.049*
F₀	0.272	0.026*	0.347	0.882	0.071	0.009*
b₁	0.248	0.757	0.530	0.590	0.023*	0.012*
LF	0.008***	0.000***	0.347	0.242	0.480	0.778
HF	0.136	0.000***	0.308	0.397	0.239	0.819

*** - $p < 0.001$, ** - $p < 0.01$, * - $p < 0.05$.

Отдельно были проанализированы для каждой группы изменения показателей ВСП при различных уровнях психической нагрузки: исходный уровень, умеренный уровень (выполнение первого и второго задания) и высокий уровень (выполнение третьего задания) психической нагрузки. Для этого использовался непараметрический T–критерий Вилкоксона для зависимых выборок (см. табл. 4). В первую очередь отметим отсутствие статистически значимых изменений показателей ВСП от первого ко второму заданию как в группе "А", так и в

группе "S". Это еще раз доказывает, что уровень психической нагрузки в первом и во втором задании был одинаков. Для группы "S" статистически значимые изменения по критерию Т-Вилкоксона были получены для показателей M, NRib (последовательное снижение значений) и F₀ (последовательное возрастание) как при переходе от исходного уровня к умеренному уровню психических нагрузок (задание 1), так и при переходе от умеренного к высокому (задание 2 – задание 3). В группе "A" такая статистически значимая дифференциальная чувствительность к различным уровням психической нагрузки была получена лишь для показателя M. В группе "S" изменение показателей SDNN, RMSSD, ND, LF и HF было статистически значимо лишь для перехода от исходного уровня к умеренному (выполнение первого задания).

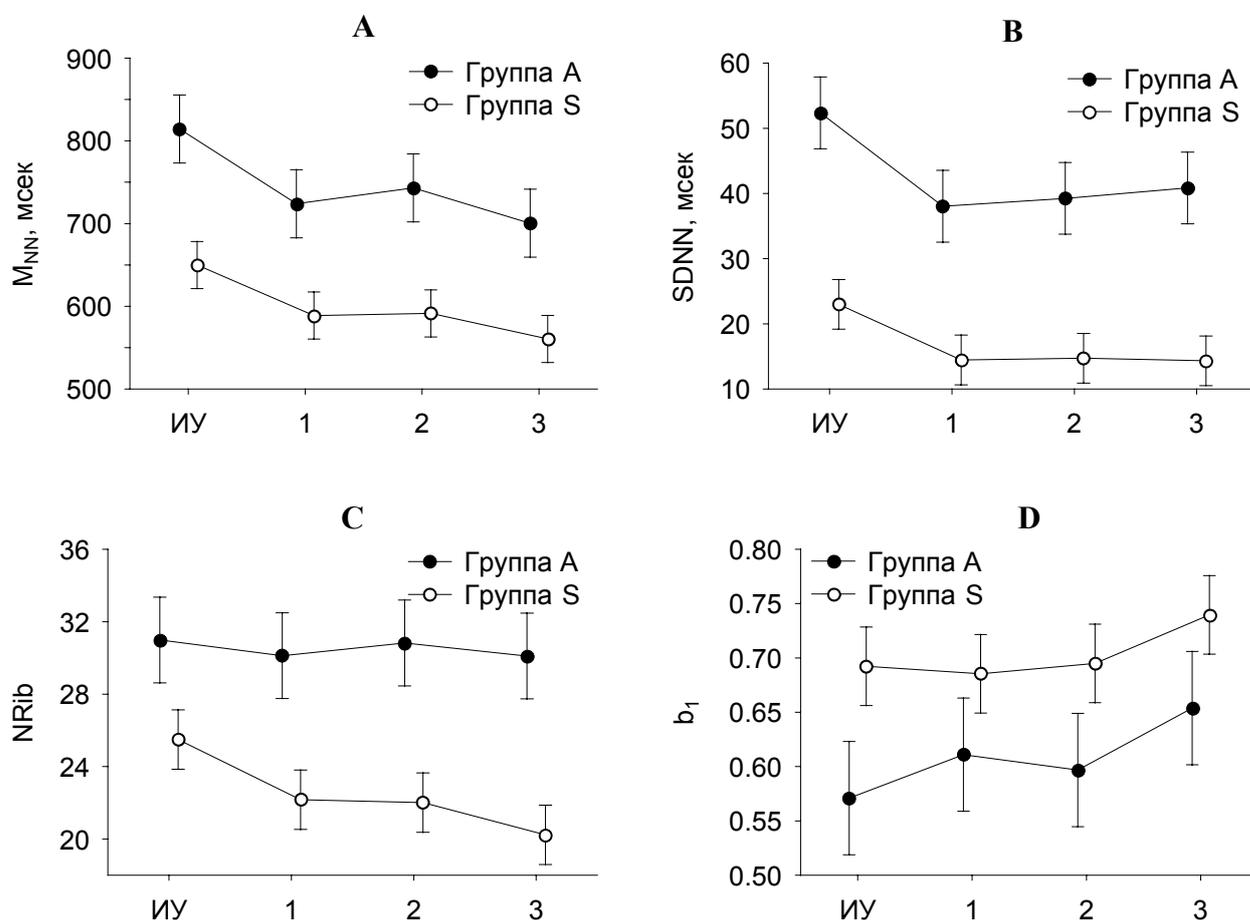
Для группы "A" такая динамика была характерна для показателей SDNN, RMSSD, ND и LF. Такие показатели как NRib, F₀ и HF не изменялись в группе "A" при умеренном уровне психической нагрузки. Показатель b₁ демонстрировал статистически значимые изменения в обеих группах лишь при переходе к высокому уровню психической нагрузки.

На рис. 1 представлены основные варианты изменения показателей BCP при различных уровнях психической нагрузки. Можно отметить (см. рис. 1B) повышение показателя SDNN в группе "A" при выполнении третьего задания (что вероятно связано с ростом эмоционального возбуждения, характерного для данной группы). Но данные изменения не достигают статистически значимых значений. Также в группе "A" наблюдается повышение показателя b₁ при переходе от исходного состояния к выполнению первого задания (см. рис. 1D), что можно отнести к росту доли активности надсегментарных структур головного мозга в регулировании сердечного ритма. Но, как и в первом случае, данный тренд не достигает статистически значимых значений.

Таким образом, показатель M (среднее значение R-R интервалов) обладает дифференциальной чувствительностью ко всем уровням моделируемой психической нагрузки (исходное состояние, умеренный уровень и высокий уровень) как в группе "A" (функциональные состояния, связанные с эмоциональным возбуждением), так и в группе "S" (функциональный класс "Психическое напряжение"). Для группы "S" показатели NRib и F₀ также оказались дифференциально чувствительными ко всем уровням психической нагрузки. Для обеих групп показатель b₁ чувствителен лишь к высокому уровню психической нагрузки. Как для группы "A", так и для группы "S" такие показатели, как SDNN, RMSSD, ND и LF чувствительны лишь к переходу от исходного состояния к психической нагрузке и не чувствительны к уровню психической нагрузки (абсолютная чувствительность). Для показателя HF такая чувствительность характерна только в группе "S".

Рисунок 1.

Графики средних значений показателей ВСП (с 95% доверительными интервалами) для групп "А" ("эмоциональное возбуждение") и "S" ("психическое напряжение") при различных уровнях психической нагрузки: ИУ - исходный уровень, 1 и 2 – умеренный, 3 – высокий.



Общие выводы

Данное экспериментальное исследование позволило проанализировать характер изменений классов функциональных состояний и показателей ВСП кандидатов на оперативные должности при различных уровнях психической нагрузки. Результаты исследования демонстрируют разнообразную и сложную динамику функциональных классов, диагностированных с помощью трехфакторной модели ВСП у кандидатов при выполнении задач различной сложности. Гетерогенность индивидуальных данных позволяет объяснить противоречивость результатов исследований, в которых анализировалась связь показателей ВСП с различными уровнями психических нагрузок.

В нашем исследовании в исходном состоянии (перед началом выполнения ответственных заданий) преобладали различные формы эмоционального возбуждения (состояние тревожного ожидания). Неожиданно высокая частота функционального класса "Психическое

напряжение" была отмечена на этой стадии. При умеренной психической нагрузке зафиксировано снижение частоты диагностируемых функциональных классов, связанных с эмоциональным возбуждением, и рост функциональных состояний, связанных с психическим напряжением. Переход к высокому уровню психической нагрузки привел к статистически значимому снижению частоты функционального состояния "Норма" и возрастанию эмоционального возбуждения. Этот рост отражает тревожно-эмоциональные реакции на возросшую сложность задачи, рост числа допущенных при выполнении ошибок, необходимость выполнения дополнительных попыток (конфликт с установкой на достижение положительного результата).

Анализ чувствительности показателей ВСР к различным уровням психической нагрузки был выполнен для двух групп, которые устойчиво характеризовались при выполнении всех трех заданий либо процессами эмоционального возбуждения (группа "А"), либо психического напряжения (группа "S"). Для них были получены высокие статистически значимые различия между показателями ВСР для каждого уровня психической нагрузки.

Анализ отдельных показателей ВСР по группам показал, что значения среднего R-R интервала (M) обладают дифференциальной чувствительностью ко всем уровням психической нагрузки (исходный, умеренный и высокий) как в группе "А" (различные формы эмоционального возбуждения), так и в группе "S" ("Общее напряжение"). Для группы "S" показатели NRib и F₀ также оказались дифференциально чувствительны ко всем уровням психической нагрузки. Для обеих групп показатель b₁ был чувствителен лишь к высокому уровню психической нагрузки (при сравнении с исходным уровнем). Как для группы "А", так и для группы "S" такие показатели, как SDNN, RMSSD, ND и LF были чувствительны лишь к переходу от исходного уровня к психической нагрузке, без дискриминации по уровню психической нагрузки (абсолютная чувствительность). Для показателя HF абсолютная чувствительность была установлена для группы "S".

Результаты данного исследования подтвердили негативную роль как психического перенапряжения, так и эмоционального перевозбуждения на эффективность выполнения ответственных заданий. Также было установлено, что диагностирование функциональных классов "Норма" и "Норма с преобладанием симпатической активности" в процессе воздействия психических нагрузок, когда наблюдается низкая надежность и эффективность деятельности, и когда отсутствуют объективные условия для развития монотонии, снижения активности оператора (усилий направленных на преодоление возникших проблем) может служить индикатором низкой мотивации субъекта на решение профессиональных задач.