

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

---

Факультет психологии

На правах рукописи

МАШИН Владимир Анатольевич

УДК 612.821

**ТРЕХФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО  
РИТМА В ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ  
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА**

19.00.03 – Психология труда. Инженерная психология, эргономика.

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора психологических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре психология труда и инженерной психологии факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

- 
- 
- 

Ведущая организация:

Защита состоится "        " \_\_\_\_\_ 2010 г. на заседании специализированного совета К 053.05.74 факультета психологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 103009, Москва, Охотный ряд, 18, корпус 5, ауд. 310.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке факультета психологии МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан "        " \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь специализированного совета,  
доктор психологических наук, профессор

А.Б. Леонова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследования**

Развитие автоматизированных систем управления сложными высокотехнологичными процессами высветило острую проблему оценки и контроля надежности человека-оператора, как одного из важнейших элементов таких систем (E.Alexandersson, C.B.Greeves, R.L.Helmreich и др.). Многими авторами отмечается общая тенденция роста доли человеческого фактора в возникновении внештатных и аварийных ситуаций, что вызвано повышением надежности механического и электронного оборудования и негативным влиянием автоматики на функциональное состояние оператора (B.A.Машин, R.Amalberti, J.L.Campbell и др.). Состояния монотонии, психического перенапряжения, утомления являются реальными источниками снижения эффективности и надежности деятельности операторов (K.A.Brookhuis, D.De Waard, J.Rueb и др.).

Сложившаяся ситуация в области человеческого фактора заставила обратить внимание специалистов по инженерной психологии и эргономике на создание эффективных и надежных методов и критериев оценки и контроля функциональных состояний человека в процессе выполнения им профессиональных задач. Данная идея, например, лежит в основе разработки адаптивных автоматизированных систем, в которых информация о функциональном состоянии человека оперативно используется для управления уровнем психической нагрузки (E.A.Byrne, A.F.Kramer, R.Parasuraman и др.).

На сегодняшний день накоплен значительный материал по оценке психической нагрузки оператора через психофизиологический контроль его функционального состояния. При этом измерения сердечно сосудистой активности (частота сердечных сокращений - ЧСС, вариабельность сердечного ритма - ВСР), согласно многочисленным авторам, оцениваются как одни из наиболее перспективных (J.Fahrenberg, E.Farmer, L.J.Prinzel 3rd. и др.). Основаниями для такого вывода стали простота использования оборудования для регистрации ВСР, разработанный математический аппарат анализа показателей, возможность

длительное время непрерывно регистрировать ЧСС без вмешательства в деятельность человека, чувствительность показателей ВСР к кратковременным изменениям в психической нагрузке (M.W.Scerbo, F.T.Eggemeier, G.F.Wilson и др.).

В действительности, в последнее десятилетие отмечается бурный рост прикладных исследований, в которых используется анализ ВСР. Можно отметить клиническое направление - оценка факторов риска, влияющих на здоровье человека, исследование и прогноз различных болезненных состояний (Р.М.Баевский, А.П.Берсенева, H.V.Huikuri и др.), задачи фармакологии - оценка действий лекарств на ВНС больного (М.В.Гуревич, H.Scheinin, B.R.Slaap и др.), психотерапии - оценка психотерапевтических воздействий на человека, исследование широкого спектра психических нарушений и расстройств, включая шизофрению, депрессию, фобии, тревожные состояния, психозы и неврозы (Р.Х.Гизатуллин, Т.Р.Вeauchaine, H.Bettermann и др.), эргономики и инженерной психологии - оценка взаимодействия автоматизированных систем управления и человека, влияния внешних и внутренних факторов на его функциональное состояние, контроль и управление психическими нагрузками (С.Dussault, С.J.G.van Driel, В.van Arem и др.), и психофизиологии – исследование личностных особенностей, высших психических функций, профессиональный отбор (О.В.Коркушко, В.А.Машин, А.L.Hansen и др.).

В тоже время многочисленные исследования с использованием показателей ВСР высветили ряд методологических и методических проблем (E.Farmer, A.F.Kramer, J.K.Lenneman и др.). До сих пор отсутствует общепринятая физиологическая интерпретация различных показателей ВСР. Выбор для экспериментальных задач отдельных показателей из многочисленного набора переменных, выражающих ВСР, зачастую никак не обосновывается и отражает лишь субъективные предпочтения исследователей. Накапливаются противоречия при сравнении результатов различных исследований, отражающие разнонаправленную динамику показателей ВСР при оценке одних и тех же феноменов (I.H.Gotlib, С.L.Hammen, M.Moser и др.).

Исследователи приходят к пониманию необходимости контроля и учета при регистрации и анализе ВСР таких факторов, как возраст, пол, дыхание, речь, движения, мотивация, содержание задачи (С.Cherri, М.Pouhonen, К.J.Reilly и др.). Другим важным фактором выступает гетерогенность индивидов относительно исходного уровня и динамики показателей ВСР при различных воздействиях (Т.W.Kamarck, W.R.Lovallo, W.Gerin и др.). Для изучения разнообразных психологических феноменов исследователи все чаще используют не упрощенные статистические связи, а сложный аппарат многомерного статистического анализа (J.J.V.Allen, I.C.Christie, В.Н.Friedman и др.). При этом возрастают требования к корректности применения тех или иных статистических методов.

**Объект исследования** – деятельность операторов в условиях воздействия различных психических нагрузок.

**Предмет исследования** – психофизиологическое содержание и закономерности развития функциональных состояний операторов, влияющих на надежность деятельности в условиях воздействия различных психических нагрузок.

**Цель исследования** – выделить и изучить на основе анализа ВСР классы функциональных состояний операторов, раскрыть их психофизиологические особенности, которые могут влиять на надежность деятельности в условиях воздействия различных психических нагрузок.

В качестве **гипотез** исследования были сформулированы следующие предположения:

1. Многомерный статистический анализ (раздел факторного моделирования) дает возможность существенно снизить высокую размерность пространства признаков ВСР и перейти от исходного обширного набора переменных к небольшому числу наиболее информативных показателей, описывающих регуляцию ВСР с помощью трехфакторной модели.

2. Трехфакторная модель ВСР позволяет классифицировать функциональные состояния человека на основе динамики показателей ВСР в трех-

мерном пространстве регуляции сердечного ритма.

3. Трехфакторная модель ВСР предоставляет возможность прогнозировать эмоциональную устойчивость операторов в критических ситуациях и анализировать эффекты психической нагрузки на надежность действий оператора с учетом таких функциональных состояний как психическое перенапряжение, эмоциональное перевозбуждение, утомление и монотония.

Данные предположения носят общий характер и в ходе исследования последовательно конкретизировались в ряде частных гипотез.

Программа исследования включала решение ряда **задач**:

1. Рассмотреть методологические и психофизиологические предпосылки исследования функциональных состояний операторов в инженерной психологии и эргономике при воздействии различных психических нагрузок.

2. Проанализировать состояние исследований в области инженерной психологии и эргономике, направленных на оценку функциональных состояний операторов с помощью методов ВСР.

3. Изучить основные противоречия, с которыми столкнулись исследователи при оценке функциональных состояний операторов с помощью методов ВСР.

4. Описать и экспериментально апробировать процедуру оценки функциональных состояний операторов с помощью показателей ВСР при моделировании различных уровней психической нагрузки.

5. Обосновать и экспериментально апробировать метод анализа показателей графа сердечного ритма для оценки нелинейной динамики ВСР на коротких выборках.

6. Проанализировать факторную структуру ВСР по показателям временной и частотной областей, а также графа сердечного ритма для определения наиболее информативных показателей для описания регуляции ВСР.

7. Установить и экспериментально обосновать классификацию функциональных состояний оператора на основе факторной модели ВСР для оп-

ределения классов функциональных состояний, влияющие на надежность действий оператора при воздействии психических нагрузок.

**Методологические основания исследования:** принцип детерминизма поведения человека и психических явлений; принцип единства психических и физиологических процессов, развитый в работах И.М. Сеченова, Л.С. Выготского, С.Л. Рубинштейна и А.Н. Леонтьева; концепция В.В. Парина и Р.М. Бавеского, согласно которой анализ физиологических механизмов регуляции сердечного ритма дает возможность получить информацию о функциональном состоянии всего организма; принцип векторного кодирования в психофизиологии, предложенного Е.Н. Соколовым; модель вегетативного двумерного пространства для регуляции сердечного ритма G.G. Berntson и J.T. Cacioppo, согласно которой, отношения между двумя отделами вегетативной нервной системы (СНС и ПНС) не сводятся исключительно к реципрокным; концепция А.М. Вейна [2003] о надсегментарных и сегментарных отделах ВНС; концепция J.E. Thayer и R.D. Lane о способности показателей ВСР отражать процессы взаимодействия центральной и вегетативной нервных систем.

В числе **методов исследования** использовались различные варианты констатирующего метода (наблюдение, экспертные оценки, тестирование); методы анализа ВСР (временные и частотные показатели); методы нелинейной динамики; специально разработанный автором для решения задач исследования метод анализа показателей графа сердечного ритма; метод многомерного статистического анализа – факторный анализ для построения факторной структура показателей ВСР. Также автором в рамках исследования были разработаны: компьютерная программа для моделирования различных уровней психической нагрузки человека-оператора (MABP.Schulte), компьютерная программа для хранения, редактирования кардиоритмограммы и анализа показателей ВСР (MABP.DB.HRV), а также компьютерная программа для моделирования и анализа показателей нелинейной динамики (MABP.Chaos).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. В многообразии показателей ВСР можно выделить трехфакторную структуру, в которой первый фактор, оцениваемый стандартным отклонением сердечного ритма, отражает общий тонус ВНС, второй, оцениваемый показателем тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма, характеризует баланс активности надсегментарного и сегментарного отделов ВНС в регулировании сердечного ритма, третий, оцениваемый средней продолжительностью сердечных сокращений, выражает баланс активности симпатических и парасимпатических структур сегментарного отдела ВНС в регулировании ритма сердца.

2. Трехфакторная модель ВСР позволяет описать 8 классов функциональных состояний человека: "Норма", "Норма с преобладанием симпатической активности", "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности", "Психическое напряжение", "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса", "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур", "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур".

3. Выраженность диагностируемых классов функциональных состояний при воздействии психических нагрузок и результаты выполнения моделируемой операторской деятельности позволяют определить психофизиологические критерии для прогнозирования эмоциональной устойчивости кандидатов на оперативные должности.

4. Во время моделирования психической нагрузки диагностируется значительное разнообразие классов функциональных состояний согласно трехфакторной модели ВСР. Пестрая и динамичная картина функциональных классов на уровне индивидов во время воздействия различных уровней психических нагрузок отражает сложную динамику показателей ВСР и позволяет объяснить противоречия в результатах психофизиологических исследований воздействий психических нагрузок.

5. При моделировании состояний тревожности, вызванных антиципацией (тревожным предвосхищением выполнения ответственного задания) и руминацией (тревожными размышлениями после выполнения ответственного задания), характерно доминирование различных форм эмоционального возбуждения: функциональные классы "Эмоциональное возбуждение" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности". Полученное на уровне индивидов разнообразие функциональных классов при моделировании эмоциональных компонентов психических нагрузок дает возможность объяснить противоречивость результатов исследований различных форм тревожности.

**Научная новизна и теоретическое значение исследования:**

Впервые описан метод анализа графа сердечного ритма, изучены связи его показателей с показателями временной и частотной областей ВСР.

Впервые проанализирована связь тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма с линейной и нелинейной динамикой ритма сердца.

Впервые определена и изучена трехфакторная модель ВСР на основе показателей временной и частотной областей ВСР, а также показателей графа сердечного ритма.

Впервые построена классификация функциональных состояний человека на основе трехфакторной модели ВСР.

Впервые на основе трехфакторной модели ВСР разработана и апробирована процедура оценки эмоциональной устойчивости оператора на основе динамики функциональных состояний и результатов выполнения тестовой деятельности.

Впервые с помощью трехфакторной модели ВСР проанализированы эффекты различной психической рабочей нагрузки на динамику функциональных состояний и предложены психофизиологические критерии для дифференциальной диагностики состояний монотонии и психического утомления.

Впервые с помощью трехфакторной модели ВСР проанализированы тревожные состояния, характерные для здоровых людей в ситуации выполнения

ответственных задач, предложены психофизиологические критерии для дифференциальной диагностики состояний тревоги и страха.

### **Практическое значение работы**

На основе трехфакторной модели ВСР была разработана и внедрена процедура психофизиологического отбора кандидатов на оперативные должности [Машин В.А., Машина М.Н., 2005]. Внедрение данной процедуры было осуществлено в 1999-2006 гг. при отборе персонала как для отечественных АЭС (концерн "Росэнергоатом"), так и зарубежных АЭС: "Тяньвань" (Китай), "Куданкулам" (Индия) и "Бушер" (Иран). Данная процедура легла в основу разработанных в 2006 году для ОАО АК Транснефть методических рекомендаций "Общие требования к психофизиологической оценке оперативного, диспетчерского и оперативно-ремонтного персонала ОАО АК Транснефть".

По материалам исследований разработана и апробирована в процессе профессионального отбора персонала АЭС компьютерная программа МАВР.DB.HRV для анализа широкого спектра показателей ВСР, позволяющая на основе трехфакторной модели диагностировать классы функциональных состояний и прогнозировать, с учетом результатов выполнения моделируемой оперативной деятельности, эмоциональную устойчивость кандидатов на оперативные должности. Дополнительно компьютерная программа МАВР.DB.HRV используется при проведении сеансов аутотренинга и релаксации с целью оценки эффективности корректирующих процедур [Машин В.А., Машина М.Н., 2000; Машин В.А., Машина М.Н., 2001].

Материалы исследований легли в основу курса психологической и психофизиологической подготовки специалистов лаборатории психофизиологических обследований АЭС "Тяньвань" (Китай), обучение которых было проведено в 2002 году.

**Достоверность и обоснованность результатов исследования** обеспечена внутренней согласованностью разработанного теоретического подхода и эмпирических процедур, разнообразием эмпирических методов, большим объ-

емом выборки испытуемых (референтную группу составили 848 здоровых мужчин), адекватностью методов качественного и количественного, в том числе, статистического анализа результатов.

### **Апробация результатов исследования**

Материалы исследований докладывались и обсуждались на Международных научно-практических конференциях "Человеческий фактор и ядерная безопасность" (Обнинск, 2001) [Машин В.А., 2001] и "Человеческий фактор безопасности атомной энергетики и промышленности" (Обнинск, 2007) [Машин В.А., 2007с, 2007d], на отраслевых совещаниях и конференциях по вопросам психофизиологического обеспечения в атомной энергетике (Москва, 1999; Балаково, 2000; Обнинск, 2002) [Машин В.А., Машина М.Н., 2002b]. По теме диссертации опубликовано 25 статей, из них 4 на английском языке.

### **Структура диссертации**

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения (общий объем 290 стр., включая 23 таблицы и 13 рисунков), списка литературы (включающего 1040 наименований, из них 822 на иностранном языке) и 16 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Глава 1. Анализ variability сердечного ритма в исследованиях функциональных состояний человека**

Бурное развитие высокотехнологичных автоматизированных систем контроля и управления сложными процессами высветило проблему надежности человека-оператора, как одного из важнейших элементов таких систем (А.Hobbs, А.Isaac, U.Kumar и др.). В аналитическом обзоре, посвященном роли человеческого фактора в различных отраслях промышленности, Erik Hollnagel установил, что доля человеческих ошибок в развитие аварийных ситуаций за последние 30 лет возросла в 4 раза. Исследования других авторов показали, что данная динамика обусловлена значимым снижением числа нарушений, обусловленных неисправностями оборудования, при этом число нарушений, вы-

званных человеческими ошибками, слабо изменилось (J.Burin, J.Z.Hecker, S.A. Shappell и др.). Эксперты сходятся во мнении, что несмотря на затраченные в последние годы усилия по повышению надежности человеческого фактора, доля ошибок, связанных с человеком, все еще остается высокой и практически не снижается (H.Courteney, T.Newman, D.O'Hare и др.).

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 воздействуют на функциональное состояние человека-оператора в процессе деятельности, и, тем самым, влияют на его надежность. Состояния монотонии, психического перенапряжения были названы реальными источниками снижения надежности деятельности человека-оператора (D.De Waard, D.Meister, R.D.O'Donnell R.D. и др.). Влияние психической нагрузки на функциональное состояние человека-оператора стало важнейшей задачей исследований по инженерной психологии, психологии труда и эргономике.

В своей работе мы специально рассмотрели содержание таких понятий как "психическая нагрузка" (или "психическая рабочая нагрузка"), "психическое напряжение", "функциональное состояние", которые зачастую произвольно используются авторами в своих исследованиях [Машин В.А., 2007b]. Анализ зарубежной и отечественной литературы позволил включить в термин "психическая нагрузка" (А.Б.Леонова, В.И.Медведев, F.Nachreiner и др.) совокупность факторов (задача, оборудование, социальное и физическое окружение, индивидуальные особенности субъекта), которые обуславливают динамику различных функциональных состояний оператора в процессе деятельности (активация, вработывание, устойчивая работоспособность, психическое напряжение, психическое утомление, монотония, снижение бдительности и психическое пресыщение) (В.Ф.Галыгин, В.С.Генес, F.Nachreiner и др.). В состоянии психического напряжения (психической напряженности) выделяют когнитивную (операционную) составляющую, обусловленную объективным содержанием за-

дачи, например, числом контролируемых параметров (А.Ф.Кramer, А.Н.Roscoe, М.В.Сcerbo и др.) и эмоциональную (нервно-эмоциональную) составляющую, которая отражает вероятность ошибочных действий, значимость последствий ошибок и результата деятельности для индивида (В.П.Зинченко, Н.И.Наенко, S.Danev и др.).

Для контроля и оценки функционального состояния операторов используются как объективные, так и субъективные показатели. Среди первых выделим измерение различных физиологических показателей: электрокардиограммы, артериального давления, электроэнцефалограммы, вызванных потенциалов, кожно-гальванической реакции, активности глаз и дыхания, потоотделения и плетизмограммы пальца, уровня кортизола в крови. При этом измерения сердечно-сосудистой активности, согласно многочисленным авторам, были наиболее популярными физиологическими показателями, используемыми для изучения функциональных состояний человека при воздействии различных психических нагрузок за последние 30 лет (L.J.Prinzel 3rd., M.W.Scerbo., W.W.Wierwille и др.). В различных аналитических обзорах и отчетах сердечно-сосудистые показатели (ЧСС, ВСР) были оценены как наиболее удобные и пригодные для полевых исследований психических нагрузок в связи с их надежностью, ненавязчивостью и простотой регистрации (длительность непрерывной регистрации ритма сердца может достигать нескольких суток), способностью быстро реагировать на кратковременные изменения функциональных состояний (J.Fahrenberg, P.A.Hancock, A.F.Kramer и др.).

Таким образом, анализ влияния человеческого фактора на возникновение и развитие внештатных производственных ситуаций высветил необходимость контроля и управления функциональными состояниями человека-оператора для обеспечения надежности его деятельности, а исследования специалистов по инженерной психологии и эргономике позволили выделить ВСР в качестве возможного психофизиологического инструментария для решения этой задачи [Машин В.А., 2007b]. Но прежде чем перейти к обзору основных направлений применения показателей динамики ритма сердца в исследованиях функцио-

нальных состояний человека-оператора, мы кратко остановились на истории развития исследований ВСР, которые касались лежащих в ее основе физиологических механизмов и методов анализа.

XX век ознаменовался переходом от качественного описания колебаний кардиоинтервалов к количественному анализу. Ранние методы анализа ВСР как правило строились на использовании кратковременных ритмограмм и включали в себя простые числовые оценки дескриптивной статистики (показатели временной области ВСР): меры средней тенденции, меры рассеяния (A.Fleisen, J.I.Lacey, S.W.Porges и др.). Начиная с 70-х годов стали активно развиваться методы спектрального анализа (показатели частотной области ВСР) для исследования биологических систем (E.O.Attinger). Впервые спектры колебаний сердечного ритма были представлены отечественными учеными в работах Р.М. Баевского и его коллег, и в экспериментах, выполненных под руководством чешского исследователя J. Penaz. В западных работах спектральный анализ получил широкое развитие после статьи S. Akselrod с соавторами (R.D.Berger, S.W.Porges, J.P.Saul и др.). Исследования в области динамических систем во второй половине XX столетия позволили сделать вывод, что нелинейные феномены, несомненно, являются одной из причин ВСР и могут содержать важную информацию для ее физиологической интерпретации (А.Н.Флейшман, A.Babloyantz, C.Braun и др.). На сегодняшний день разработаны многочисленные методы нелинейной динамики для анализа ВСР (В.С.Анищенко, D.Cysarz, R.W. Glenny и др.).

Широкое развитие анализ ВСР получил в отечественных исследованиях во второй половине XX столетия (И.Т.Акулиничев, Р.М.Баевский, А.Д.Воскресенский и др.). В 1967 году В.В. Парин и Р.М. Баевский сформулировали концепцию, согласно которой анализ физиологических механизмов регуляции сердечного ритма дает возможность получить информацию о функциональном состоянии всего организма. В 1966 году в Москве состоялся 1-й Всесоюзный симпозиум по ВСР. На этом симпозиуме Р.М. Баевский предложил двухконтурную модель регуляции сердечного ритма: управляющего централь-

ного (подкорковые и высшие вегетативные центры, корково-лимбические механизмы регуляции – надсегментарные структуры по А.М. Вейну) и управляемого автономного (синусовый узел, блуждающие нервы и их ядра в продолговатом мозге – сегментарные структуры) контуров. Идеи Р.М. Баевского были в последующем развиты в работах А.Н. Флейшмана, который описал модель 4-х уровней нервной регуляции сердечного ритма: сегментарный (автономный), стволовой, гипоталамический и полушарный уровни регуляции. В 70-е годы Р.М. Баевский сформулировал гипотезу о связи колебательных процессов в организме с деятельностью различных уровней системы управления физиологическими функциями. Согласно этой гипотезе, чем длиннее период колебаний, тем с более высоким уровнем управления они связаны. Первая монография по анализу ВСП была опубликована в нашей стране (Р.М.Баевский).

Бурный рост исследований по ВСП в различных областях и в различных странах способствовал созданию рекомендаций по стандарту измерений, физиологической интерпретации и клиническому использованию ВСП (M.Malik) и методических рекомендаций по анализу ВСП при использовании различных электрокардиографических систем (Р.М.Баевский). Стремительное развитие методов анализа ВСП, разработка физиологических основ различных компонентов динамики сердечного ритма, предопределило широкое использование показателей ВСП в исследованиях функциональных состояний человека. В своей работе мы значительное внимание уделили результатам психофизиологических экспериментов в этой области, отдельно рассмотрев воздействие психических нагрузок в лабораторных, тренажерных и реальных условиях.

Голландский исследователь J.W. Kalsbeek был одним из первых, кто попытался использовать ВСП как индикатор психической нагрузки, обнаружив постепенное снижение вариабельности R-R интервалов (SDNN) по мере роста сложности выполнения психических задач. Постепенно ВСП становится для исследователей одним из важнейших объективных показателей психической нагрузки. В первых исследованиях изменения ВСП были проанализированы при выполнении заданий на внимание (S.W.Porges), мышление (K.S.Bowers), время

реакции (G.Mulder, S.W.Porges), при провоцировании ошибочных реакций (S.G.Danev), при воздействии слуховых раздражителей (G.Vranekovic). Различные экспериментальные исследования в лабораторных условиях продемонстрировали, что ослабление синусовой аритмии (временные и частотные показатели ВСР) может рассматриваться как индикатор возрастания психической нагрузки и внимания (P.S.Blitz, S.H.Boutcher, J.H.Ettema и др.). Было проведено значительное число лабораторных исследований, которые продемонстрировали связь между психической рабочей нагрузкой и ослаблением или полным исчезновением дыхательной синусовой аритмии - ДСА (M.T.Allen, P.R.Boyce, M.Hitchen и др.), мощности среднечастотного диапазона ВСР - MF (D.De Waard, K.A.Brookhuis, G.Mulder и др.)

Исследователи продолжают активно изучать в лабораторных условиях влияние различных видов психической нагрузки на ВСР при выполнении задач на мышление (M.G.Coles, A.Stepto, K.K.Tripathi и др.), память (R.W.Backs, W.P.Brinkman, P.G.Jorna и др.), внимание (J.Aasman, M.Althaus, R.W.Backs и др.). Данные исследования направлены на более углубленное понимание связи ВСР и регулирующих ее физиологических механизмов с высшими психическими функциями. Также исследователей интересует роль личностных особенностей при воздействии психических нагрузок: свойств темперамента, мотивации, стилей поведения (M.Althaus, T.M.Dembroski, E.Mezzacappa и др.).

Постепенно исследования функциональных состояний при воздействии различных психических нагрузки из лабораторий переносятся на тренажеры и в реальные условия (J.A.Dellinger, J.A.Caldwell, Y.Itoh и др.). Пионерами здесь выступают специалисты по авиационной и космической физиологии (И.Т.Акулиничев, Р.М.Баевский, С.Н.Ормеер и др.). Исследования связи показателей ВСР с психической нагрузкой в реальных условиях затрагивают широкий спектр профессий: пилоты (R.W.Backs, P.G.Jorna, A.Lindqvist и др.), авиадиспетчеры (J.B.Brookings, N.Egelund, F.G.Hilburn и др.), водители (K.A.Brookhuis, D.De Waard, W.H.Janssen и др.), радиодикторы (M.Bronis), операторы ЭВМ (Р.М.Баевский, К.В.Овчинников, Т.Pinkrank и др.), машинисты

электропоездов (M.Myrtek) и железнодорожные диспетчеры (N.Claassen), медицинские сестры (H.Riese), промышленные рабочие (M.G.Kang), матросы (A.L.Hansen). Отдельно отметим перспективное направление, связанное с оценкой эффективности программ обучения, уровня напряжения при выполнении учебных заданий, приближенности тренажеров к реальным условиям с помощью показателей ВСП (P.G.Jorna, Y.H.Lee, E.Lindholm и др.).

Во многих работах в области инженерной психологии и эргономики обосновывается важность контроля психической нагрузки как критического фактора при проектировании и эксплуатации современных и модифицированных авиалайнеров (M.A.Bonner, C.Dussault, T.C.Hankins и др.), при разработке и оценке новейших визуальных средств поддержки авиадиспетчеров (J.V.Brookings, C.T.DeSenti, P.G.Jorna и др.), компьютерных программ (L.Izso). Большое внимание психической нагрузке уделяется при разработке и оценке автоматизированных средств поддержки водителей (D.De Waard, T.Diamon, M.Gobel и др.) и адаптивных автоматизированных систем управления (A.Hoover, A.F.Kramer, J.Lee и др.). Ряд исследователей специально использовали показатели ВСП для анализа различных параметров рабочего места: цветовой температуры источников света, уровня освещенности, теплового комфорта, шума, концентрации негативных ионов в воздухе (аэроионов) и даже одежды (Y.Hasebe, K.Ishibashi, E.Lang и др.). Значительное число исследований было выполнено для изучения таких факторов, влияющих на профессиональную деятельность, как режим работы, содержание труда, социальный статус (S.M.Collins, R.Furlan, M.На и др.).

Выполненный обзор исследований убедительно доказывает растущий интерес к использованию показателей ВСП в изучении функциональных состояний человека при воздействии различных психических нагрузок. И все же, результаты многочисленных исследований высветили ряд существенных противоречий, на которых мы остановились в заключительной части данной главы.

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал относительно чувствительности показателей ВСП к различным уровням психической рабочей нагрузки (R.D.O'Donnel, M.W.Scerbo, J.A.Veltman и др.). Подобно тому, как это делается в психофизике, можно выделить абсолютную чувствительность - способность физиологического показателя дифференцировать состояние покоя и психическую рабочую нагрузку, и дифференциальную чувствительность - способность физиологического показателя дифференцировать различные уровни психической рабочей нагрузки. Первоначально показатели ВСП представлялись исследователям как индикаторы психической нагрузки, обладающие не только абсолютной, но и дифференциальной чувствительностью, что подтверждается рядом лабораторных экспериментов (J.Aasman, P.S.Blitz, L.R.Fournier и др.). Но при этом растет число исследований, в которых демонстрируется лишь абсолютная чувствительность показателей ВСП к различным уровням лабораторных психических нагрузок (S.H.Boutcher, S.H.Fairclough, P.Nickel и др.). Не во всех исследованиях установлена дифференциальная чувствительность ЧСС (S.H.Boutcher, L.R.Fournier, J.W. Kalsbeek и др.).

В исследованиях на тренажерах преобладают результаты, которые подтверждают лишь абсолютную чувствительность показателей ВСП (J.V.Brookings, F.Cnossen, P.G.Jorna и др.). В тоже время имеются данные в пользу дифференциальной чувствительности показателей ВСП (C.T.DeSenti, F.G.Hilburn, A.Lindqvist и др.). Противоречивые данные были получены в ходе тренажерных экспериментов и для ЧСС. В исследованиях (F.Cnossen, C.Collet, E.Lindholm и др.) был сделан вывод в пользу дифференциальной чувствительности ЧСС к уровню психической нагрузки, а в исследованиях (J.G.Casali, C.Dussault, T.G.Hicks и др.) ЧСС не различалась при выполнении задач различной сложности.

Результаты исследований, выполненных в реальных условиях, более последовательны. Данные работ (P.Comens, C.Dussault, T.C.Hankins и др.) продемонстрировали, что ЧСС может служить удобным индикатором уровня психи-

ческой нагрузки. Для показателей ВСП преобладают результаты, которые позволяют сделать вывод в пользу лишь абсолютной чувствительности (Т.С.Hankins, Y.Itoh, G.Jahn и др.).

Противоречивость результатов характерна не только для исследований чувствительности показателей ВСП к различным уровням психической нагрузки, но также и для анализа динамических изменений показателей ВСП при воздействии различных психических нагрузок. Например, многие исследователи получили подтверждение снижения спектральных показателей ВСП (LF, MF, HF) при действии различных типов психических нагрузок (Н.Н.Данилова, F.G.Hilburn, P.G.Jorna и др.). В тоже время не было установлено значимых изменений показателя HF при выполнении арифметической задачи (S.H.Boutcher), заданий на оперативную память, длительную концентрацию внимания и сложную сенсомоторную реакцию (К.К.Tripathi). Эксперименты (N.Hjortskov, W.H.Janssen, W.Langewitz и др.) продемонстрировали отсутствие значимых изменений в LF показателе при воздействии различных психических нагрузок, а в исследованиях (J.P.Delaney, M.Pagani, N.Sato и др.) показатель LF значимо повышался при воздействии психических нагрузок. Противоречивые данные получены также и относительно показателя SDNN. В одних работах (K.S.Bowers, J.W.Kalsbeek, S.W.Porges и др.) было продемонстрировано снижение этого показателя с ростом психической нагрузки, а в других – рост (K.Ishibashi, C.Sekiguchi, A.Yasukouchi и др.) либо отсутствие значимых изменений (R.P.Sloan).

Анализ причин противоречий в результатах анализа ВСП при воздействии психических нагрузок позволил исследователям выделить следующие факторы (E.Farmer, A.F.Kramer, J.K.Lenneman и др.): низкая мотивация испытуемых (Э.Л.Боднар, Г.И.Сидоренко, М.А.Воннер и др.), недостаточный уровень сложности экспериментальных задач для определения дифференциальной чувствительности показателей ВСП (L.R.Fournier, P.G.Jorna, F.G.Paas и др.), воздействие вербальной активности на компоненты ВСП (L.Bernardi, C.Cherri, K.J. и др.), роль движений человека в изменении показателей ВСП (J.O.Fortrat,

О.Inomata, 1977; H.Luczak и др.), возрастные (О.В.Коркушко, А.В.Писарук, F.Beckers и др.) и гендерные различия исследуемых групп (M.W.Agelink, D.E.Dietrich, J.W.Hughes и др.), эффекты дыхания на колебания сердечного ритма - частоты, глубины, парциального давления углекислого газа в артериальной крови (L.Bernardi, D.M.Bloomfield, J.H.Houtveen и др.), гетерогенность индивидуальной динамики показателей ВСР (С.В.Булатецкий, Н.Н.Данилова, С.Collet и др.), корректное использование статистического анализа.

В своих исследованиях мы попытались проконтролировать выше перечисленные факторы, которые могут влиять на оценку динамики показателей ВСР при воздействии различных психических нагрузок. Это нашло отражение в процедуре регистрации сердечного ритма и моделирования психических нагрузок, которая описана во второй главе нашей работы. Вопросы гетерогенности индивидуальной динамики показателей ВСР при воздействии различных психических нагрузок стали одной из ключевых задач наших экспериментальных исследований.

## **Глава 2. Методическое обеспечение исследований функциональных состояний человека методами вариабельности сердечного ритма**

В наших исследованиях воздействия психической нагрузки на функциональное состояние человека были использованы данные регистрации сердечного ритма, полученные в процессе отбора кандидатов на оперативные должности и обследований операторов АЭС в лаборатории психофизиологического обеспечения Нововоронежского учебно-тренировочного центра подготовки специалистов для АЭС. Процедура психофизиологического обследования была спланирована таким образом, чтобы иметь возможность контролировать те факторы, которые могли бы повлиять на регистрацию и анализ показателей ВСР.

Уникальность ситуации с жесткими требованиями профессионального отбора позволяла в лабораторных контролируемых условиях моделировать очень значимые для участников психические нагрузки, что обеспечивало высокую мотивацию индивидов в ситуации обследований (фактор мотивации). В

исследованиях приняли участие мужчины, из которых формировались экспериментальные группы, не отличавшиеся статистически значимо по возрасту (факторы возраста и пола). Для моделирования психических нагрузок разного уровня мы использовали специально разработанный нами компьютерный вариант теста "Черно-красная таблица" Шульте-Горбова (Ф.Д.Горбов) [Машин В.А., 2007b]. Данная методика хорошо зарекомендовала себя в профессиональном отборе (Н.Г.Аринчина, В.А.Машин). Она позволяет моделировать нагрузки двух уровней: на концентрацию внимания (одиночная задача) и на переключаемость внимания (двойная задача). Тем самым мы могли учесть точку зрения тех исследователей, которые предлагали для оценки дифференциальной чувствительности показателей ВСП использовать задачи, которые значительно различаются в уровне сложности (P.G.Jorna, F.G.Paas, J.A.Veltman и др.) (фактор уровня сложности задач). Во время всей процедуры тестирования и регистрации сердечного ритма от обследуемых требовалось не разговаривать (фактор речи). В процессе выполнения тестовых заданий обследуемые совершали незначительные движения правой рукой для управления компьютерной "мышью" (фактор движений). Что касается фактора дыхания, то моделируемые в наших экспериментах психические нагрузки, согласно аналитическому обзору J.H. Noutveen с соавторами, позволяют использовать показатели ВСП без коррекции по эффектам дыхания. Таким образом, применение методики Шульте-Горбова обеспечивало, с одной стороны, моделирование психической нагрузки реальной оперативной деятельности [Машин В.А., 1994с], а с другой, жесткий контроль экспериментальной ситуации (G.F.Wilson). В каждой серии наших экспериментальных исследований особое место занимали вопросы обоснованности применения различных статистических методов для анализа конкретных данных (фактор статистического анализа).

Наблюдения за поведением операторов в процессе обследований, результаты психологического тестирования и собеседований позволили нам выделить 4 функциональных состояния [Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001], которые мы использовали в своих исследованиях как базовые: "Психическое на-

пряжение" - высокая мобилизация и концентрация усилий обследуемых при воздействии психических нагрузок (Т.А.Немчин, D.De Waard, D.Meister и др.); "Эмоциональное возбуждение" - гиперактивность, импульсивность, суетливость, многословность в процессе ожидания операторами тестовых заданий (Б.А.Душков, Е.П.Ильин, М.Муртек и др.); "Психическое утомление" – трудности длительной концентрации усилий на выполнение заданий психологического обследования, снижение продуктивности, ухудшение памяти и внимания к концу тестирования, жалобы на постоянную усталость, вялость, повышенную утомляемость и сонливость (А.Б.Леонова, В.Л.Марищук, Е.Åhsberg и др.); "Норма" - обследуемым в данном функциональном состоянии не было характерно психическое напряжение, эмоциональное возбуждение, психическое утомление и другие негативные состояния.

Особое внимание мы уделили проблеме эквидистантности временного ряда для расчета спектральных показателей ВСР (Р.М.Баевский, Э.Ллойд, М.Malik и др.). Согласно исследованиям, выполненным в последние годы (G.D.Clifford, P.Laguna), интерполяция и повторная выборка R-R интервалов для преобразования исходного временного ряда в эквидистантный может приводить к переоцениванию мощности спектральной плотности сердечного ритма и возникновению эффекта фильтра низких частот при использовании классических методов спектрального анализа: быстрого преобразования Фурье, авторегрессионного метода. Чтобы избежать этих негативных последствий, мы представили результаты наших исследований [Машин В.А., 2002b, 2002c], в которых обосновывается процедура оценки распределения мощности спектра колебаний сердечных сокращений по частотным диапазонам без приведения исходного ряда R-R интервалов к эквидистантному. Для этого мы используем формулу:  $f_d = f_{d1.0} \times M$ , где  $f_{d1.0}$  - частота спектрального диапазона при  $M = 1.0$  сек,  $f_d$  - частота спектрального диапазона при текущем значении  $M$ ,  $M$  – средний R-R интервал исходного ряда (сек). Данная формула позволяет скорректировать (нормировать) границы частотных диапазонов спектральной мощности сердечных сокращений относительно текущего значения  $M$  и решить задачу

сравнения спектральных показателей различных временных рядов без предварительного преобразования их в эквидистантный ряд.

В рамках описания процедуры регистрации и анализа показателей ВСП в процессе воздействия психических нагрузок на функциональное состояние операторов был представлен используемый нами методический комплекс: временные, спектральные и нелинейные методы анализа ВСП. При этом мы уделили особое внимание современным представлениям об их физиологическом содержании. Нами были рассмотрены следующие временные и спектральные показатели ВСП:  $M$  - средний R-R интервал (Р.М.Баевский, В.П.Казначеев, P.Coumel и др.),  $M_0$  - мода (Р.М.Баевский, В.В.Попов),  $AM_0$  - амплитуда моды (Р.М.Баевский, В.В.Попов),  $MxDMn$  - вариационный размах (Р.М.Баевский, В.В.Попов), ИН - индекс напряжения регуляторных систем Р.М. Баевского, SDNN - среднее квадратическое отклонение R-R интервалов (Р.М.Баевский, О.Б.Степура, G.G.Berntson и др.), CV - коэффициент вариации R-R интервалов (Р.М.Баевский), RMSSD - квадратный корень из среднего значения квадратов разностей величин последовательных R-R интервалов (Р.М.Баевский, В.В.Попов, J.Nauno и др.), pNN50 - доля последовательных R-R интервалов, различие между которыми превышает 50 мс (Р.М.Баевский, В.В.Попов, R.E.Kleiger и др.),  $CC_1$  - значение первого коэффициента автокорреляционной функции (Р.М.Баевский), HF - мощность спектра сердечного ритма в высокочастотном диапазоне (Р.М.Баевский, В.М.Хаютин, S.Akselrod и др.), LF – мощность спектра сердечного ритма в низкочастотном диапазоне (Р.М.Баевский, S.Akselrod, G.G.Berntson и др.), VLF – мощность спектра сердечного ритма в очень низкочастотном диапазоне (Р.М.Баевский, D.Bonaduce, F.D.Dykes и др.), нормализованные значения спектральных показателей –  $VLF_{nu}$ ,  $LF_{nu}$ ,  $HF_{nu}$  (Р.М.Баевский, R.Furlan, M.Malik и др.) и отношение мощности спектра в LF и HF диапазонах – LF/HF (Р.М.Баевский, В.М.Хаютин, D.L.Eckberg и др.).

Детально в нашей работе были рассмотрены взгляды отечественных исследователей на физиологическую природу VLF компонента ВСП, которые исходят из сформулированного еще в 1984 году Р.М. Баевским предположения,

что колебания сердечного ритма в VLF диапазоне связаны с активностью надсегментарных центров вегетативной регуляции, которые генерируют медленные ритмы, передающиеся к сердцу через симпатическую нервную систему. Это предположение нашло подтверждение в результатах исследований А.Н. Флейшмана и Н.Б. Хаспековой, выполненных на материале органических поражений головного мозга (опухоли, инсульт, паркинсонизм) и неврологической патологии (больные с пароксизмальными вегетативными расстройствами: нейрогенные обмороки, панические атаки и приступы мигрени). Согласно нашим данным [Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000], активация надсегментарного уровня регуляции сердечного ритма (корково-лимбических структур, отвечающих за интеграцию психических, соматических и вегетативных функций, формирование поведенческих реакций, эмоций, мотивации, памяти и внимания) играет важную роль в формировании колебаний ритма сердца в VLF диапазоне при эмоционально-невротическом возбуждении. Специально в нашей работе были рассмотрены исследования, посвященные отношениям между корково-лимбическими (надсегментарными) и сердечно-сосудистыми процессами (Y.Bar-Haim, E.E.Benarroch, D.F.Cechetto и др.), в ходе которых рядом ученых была выдвинута гипотеза о тормозящих корково-подкорковых контурах (inhibitory cortical-subcortical circuits) (D.L. Masterman, H.S.Mayberg, K.M.Spyer и др.), которые J.F. Thayer и R.D. Lane впервые связали с вариабельностью сердечного ритма.

Подчеркнув значительный рост работ, в которых центральное место занимают методы нелинейной динамики для определения степени хаотичности (неопределенности) сердечного ритма при различных функциональных состояниях и психических расстройствах (S.Guzzetti, R.K.Rao, D.J.Redington и др.), мы подробно рассмотрели следующие показатели нелинейной динамики:  $\lambda_1$  - максимальная экспонента Ляпунова (D.Nychka, M.T.Rosenstien, R.L.Smith и др.);  $D_2$  - корреляционная размерность (J.K.Kanters, G.Mayer-Kress); L, S, T - показатели графика Пуанкаре (или Лоренца) (P.М.Баевский, M.Brennan, P.W.Kamen и др.).

Поскольку исследование методами нелинейной динамики свойств ВСР при воздействии кратковременных психических нагрузок затруднено из-за требования значительной длины временного ряда для приложения соответствующего математического аппарата (С. Braun, М.А. Nerenberg, Y. Yamamoto и др.), мы использовали в наших исследованиях для анализа нелинейной динамики на коротких выборках разработанный нами метод анализа графа сердечного ритма [Машин В.А., 2002а; Машин В.А., Машина М.Н., 2002а; Mashin V.A., 2002]. Данный метод представляет собой развитие математического аппарата анализа графика Пуанкаре. Нами представлены результаты сравнительных исследований показателей графов сердечного ритма гармонических колебаний, моделей "белого шума", базовых функциональных состояний. Была установлена высокая корреляционная связь показателя ND (число узлов графа) с энтропией распределения вершин в графе. Это дало нам основание говорить о показателе ND как мере энтропии (неопределенности) графа сердечного ритма. При этом, чем выше психическое напряжение организма, тем меньше энтропия (хаотическая динамика) сердечного ритма. При расслаблении организма энтропия (хаотическая динамика) сердечного ритма наоборот возрастает. При равенстве узлов двух графов, более глубокое расслабление (большая энтропия) будет при меньших значениях накопленной частоты рангов компонент. Проведенный корреляционный анализ позволил определить взаимные связи между показателями структуры графа и спектрального анализа ВСР.

Последующий анализ структуры графа сердечного ритма [Машин В.А., Машина М.Н., 2004; Машин В.А., 2006; Mashin V.A., 2006] дал нам возможность выделить дополнительный показатель  $b_1$  - тангенс угла наклона линии регрессии графа, который сыграл важную роль в наших последующих исследованиях. Данный показатель имеет тесную связь с первым коэффициентом автокорреляционной функции ( $CC_1$ ):  $b_1 = CC_1 \times (SDNN_{n+1}/SDNN_n)$ , где  $SDNN_n$  - стандартное отклонение исходного массива  $R-R_n$ ,  $SDNN_{n+1}$  - стандартное отклонение массива  $R-R_{n+1}$  (Дж.Гласс). Исследуя показатели  $b_1$  для моделей "белого шума" и "гауссова шума", мы выдвинули предположение, что данный по-

казатель может служить индикатором степени неопределенности процесса, его хаотичности. В пользу этого говорил анализ базовых функциональных состояний. Так для функционального состояния "Норма" (когда наиболее велико влияние ПНС в регулировании сердечного ритма) были характерны низкие значения показателя  $b_1$ . Максимальные значения  $b_1$  наблюдались при функциональном состоянии "Эмоциональное возбуждение", когда возрастала активность надсегментарных (корково-лимбических) структур головного мозга в регулировании сердечного ритма [Машин В.А., Машина М.Н., 2000; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000].

Для дополнительной проверки гипотезы о связи показателя  $b_1$  с уровнем неопределенности, хаотичности сердечного ритма, нами было выполнено специальное исследование, с привлечением показателя корреляционной размерности -  $D_2(m)$  [Машин В.А., 2006; Mashin V.A., 2006]. Для определения уровня стохастического процесса в динамике сердечного ритма на коротких временных рядах мы использовали показатель  $sD_2$  - средняя сумма квадратов отклонений графика значений  $D_2(m)$  как функции размерности псевдофазового пространства вложения ( $m$ ) от диагонали ( $m, m$ ).

Результаты исследований с использованием модельных данных (гармонических колебаний с наложением "гауссова шума") и реальных временных рядов сердечного ритма позволили установить, что показатель тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма ( $b_1$ ) отражает как линейные (периодические колебания), так и нелинейные процессы (стохастический шум) в динамике ритма сердца на коротких стационарных отрезках. Два основных параметра влияют на значения  $b_1$  – это период колебаний сердечного ритма и относительный уровень шума. Возрастание периода колебаний (характерно для активности надсегментарных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма или центрального контура по Р.М. Баевскому) отражается в росте показателя  $b_1$ , повышение относительного уровня шума (активности парасимпатического отдела сегментарных структур ВНС или автономного контура по Р.М. Баевскому) вызывает снижение значений показателя  $b_1$ . Анализ относительного

и абсолютного уровня шума в динамике сердечного ритма при различных функциональных состояниях и пробах на контролируемое дыхание позволил установить, что рост относительного уровня шума в динамике сердечного ритма при повышении частоты дыхания обусловлен не только снижением амплитуды дыхательных волн, но и ростом амплитуды самого шума. Снижение абсолютного уровня шума ( $a$ , следовательно, и тонуса вагуса) было получено при эмоциональном возбуждении, в состоянии психического утомления (при сохранении относительного уровня шума), и, особенно, при психическом напряжении (концентрация усилий на задаче). В состоянии утомления и психического напряжения это сопровождается снижением общей ВСР (SDNN). При эмоциональном возбуждении повышение общей ВСР достигается (на что указывают высокие значения показателя  $b_1$ ), в первую очередь, через рост амплитуды низкочастотных колебаний (этим обусловлено выраженное снижение относительного уровня шума в данном состоянии). В норме в состоянии покоя регистрируются высокие значения как для относительного, так и для абсолютного уровня шума (высокий тонус вагуса): нелинейные (стохастические) процессы преобладают над линейными (периодические колебания).

Таким образом, во второй главе была представлена общая процедура регистрации сердечного ритма и определены основные показатели ВСР для последующего психофизиологического анализа эффектов психической нагрузки на человека. При этом мы обратили внимание на обилие различных показателей и индексов для оценки вариабельности ритма сердца и на их противоречивую динамику при воздействии психических нагрузок, что делает выполнение этой задачи крайне затруднительной. Для ее решения нам потребовалось предварительно использовать математический аппарат многомерного анализа (факторное моделирование) для снижения анализируемого пространства показателей ВСР и выделения наиболее информативных. Результатом этой работы стала разработка трехфакторной модели ВСР, которой и посвящена следующая глава.

### **Глава 3. Разработка факторной модели вариабельности сердечного ритма**

При использовании методов анализа ВСП исследователям приходится иметь дело с исходными данными высокой размерности, когда число регистрируемых показателей может достигать несколько десятков (например, разработанная нами программа МАВР.DBase-HRV рассчитывает более 100 различных показателей ВСП). В подобной ситуации объяснимо желание исследователей существенно снизить размерность анализируемого пространства признаков, перейти от исходного набора показателей к небольшому числу переменных, которые либо отбираются из числа исходных, либо строятся по определенному правилу по совокупности исходных показателей. Впоследствии эти переменные позволяют исследователям достаточно точно воспроизвести интересующие их свойства анализируемого массива данных (С.А.Айвазян). Для снижения размерности анализируемого пространства признаков, отбора наиболее информативных показателей и классификации объектов используется многомерный статистический анализ, включающий в себя такие методы как анализ главных компонент, факторный и дискриминантный анализы.

В своей работе мы специально рассмотрели примеры использования методов многомерного анализа для изучения сложной динамики ВНС при различных эмоциональных состояниях (I.C.Christie, I.Nycklicek), для надежного различения паттернов активности ВНС во время воздействия различных психических нагрузок (J.J.Allen, R.W.Backs, B.H.Friedman и др.), для оценок сердечного возраста методами ВСП (A.Colosimo) и фармакологических воздействий на сердечный вагусный тонус (J.Nayano).

Подробно мы остановились на предложенной G.G. Berntson и J.T. Casioippo модели вегетативного двумерного пространства для регуляции сердечного ритма. G.G. Berntson и J.T. Casioippo представили регуляцию сердечного ритма как функцию двух независимых переменных (факторов): активности симпатической и парасимпатической систем, воздействующих на пейсмекер-

ные клетки синусового узла. Они предположили, что вегетативный контроль органов, иннервированных СНС и ПНС, не может быть адекватно рассмотрен как континуум, простирающийся от ПНС к СНС области. Скорее всего, двумерное вегетативное пространство, ограниченное осями СНС и ПНС, является минимальным отображением многоуровневых разнообразных моделей вегетативного контроля. Экспериментально они попытались обосновать, что изменения активности СНС и ПНС в условиях психической нагрузки (арифметический тест, речевое сообщение) независимы, и для объяснения реактивности сердечного ритма необходимо использовать двухфакторную модель (J.T. Casiporro). В исследованиях, выполненных под руководством R.W. Basks, обосновывается эффективность использования модели вегетативного двумерного пространства для оценки психической рабочей нагрузки как в лабораторных исследованиях, так и при выполнении пилотами и водителями заданий на тренажере и в реальных условиях. Используя модель вегетативного двумерного пространства, J.K. Lenneman и R.W. Basks описали 8 возможных режимов вегетативной регуляции сердечного ритма.

Отталкиваясь от модели вегетативного двумерного пространства и развивая принцип векторного кодирования в психофизиологии, предложенного Е.Н. Соколовым, Н.Н. Данилова использовала в своих исследованиях трехмерное векторное пространство для описания динамики сердечного ритма при воздействии различных видов психической нагрузки. Первый фактор этой модели (VLF) отражает метаболические, второй (LF) – сосудистые и третий (HF) дыхательные процессы, влияющие на регуляцию сердечного ритма.

В целом, использование методов многомерного статистического анализа в исследованиях ВСР достаточно ограничено. Во многих работах авторы имплицитно прибегают к снижению размерности анализируемого пространства признаков через произвольный выбор показателей ВСР для своих целей. Зачастую такой выбор не имеет четких обоснований и носит отпечаток субъективизма. В своей практике применения методов анализа ВСР для целей профессионального отбора операторов АЭС мы также столкнулись с проблемой выбора

наиболее информативных показателей из многочисленного пространства признаков. Для решения ее мы воспользовались процедурой факторного анализа [Машин В.А., Машина М.Н., 2004], который позволил нам выделить три фактора.

Первый фактор сгруппировал показатели, которые имели выраженную положительную связь с SDNN. Этот фактор был интерпретирован как фактор общего тонуса ВНС (О.Б.Степура) и для его оценки использовался показатель SDNN. Характерные для первого фактора связи были также обнаружены в исследованиях (A.Colosimo, R.E.Kleiger, M.M.Massin). Второй фактор сгруппировал показатели, которые имели выраженную положительную связь с показателем  $b_1$ . Данный фактор отражает баланс между активностью надсегментарного (повышение значений  $b_1$  за счет роста VLF компонента и снижения нелинейной динамики) и сегментарного (снижение значений  $b_1$  за счет роста нелинейной динамики в сердечном ритме и уменьшения VLF компонента) уровней регуляции сердечного ритма. Заметим здесь, что первый фактор общего тонуса ВНС (оцениваемый показателем SDNN) отражает суммарную активность как надсегментарных, так и сегментарных структур головного мозга, участвующих в регуляции сердечного ритма (Р.М.Баевский). Третий фактор имел высокую положительную нагрузку с показателями  $M$  и  $M_0$ . Согласно точке зрения, выраженной в работах (P.Coumel, J.J.Goldberger, Y.Murakawa), данный фактор отражает баланс между активностью симпатического и парасимпатического отделов ВНС в регулировании сердечного ритма. Для оценки этого фактора был использован показатель  $M$ .

Выделенная с помощью факторного анализа структура представляет собой трехмерное пространство для описания процессов регулирования сердечного ритма, и может рассматриваться как дальнейшее развитие идей Р.М. Баевского, А.Н. Флейшмана и Н.Б. Хаспековой, а также G.G. Verntson и J.T. Cascioppo. Но если модель двумерного пространства G.G. Verntson и J.T. Cascioppo ограничена описанием сегментарных влияний на регуляцию сердечного ритма (парасимпатических и симпатических структур автономного контура), то в на-

шей модели мы, в след за Р.М. Баевским, А.Н. Флейшманом и Н.Б. Хаспековой, учитываем также активность надсегментарных (корково-лимбических) структур головного мозга.

Нормированные по данным референтной группы (848 человек) наиболее информативные показатели трехфакторной модели ВСП ( $SDNN_n$ ,  $b_{1n}$  и  $M_n$ ) позволили нам описать 8 классов функциональных состояний [Машин В.А., Машина М.Н., 2004; Машин В.А., 2007b]:

1. Функциональный класс "Норма" ( $SDNN_n$  5÷9,  $b_{1n}$  1÷4,  $M_n$  5÷9) – высокий общий тонус ВНС, преобладание активности сегментарного уровня регулирования сердечного ритма над корково-лимбическим (надсегментарным), преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса диагностируются в состоянии покоя, при глубоком расслаблении и во время сна при сохранении функциональных резервов (трофотропная деятельность).

2. Функциональный класс "Норма с преобладанием симпатической активности" ( $SDNN_n$  5÷9,  $b_{1n}$  1÷4,  $M_n$  1÷4) – высокий общий тонус ВНС, преобладание активности сегментарного уровня регулирования сердечного ритма над корково-лимбическим, преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса диагностируются у лиц с высоким тонусом активности в состоянии покоя, а также при экономичной регуляции сердечного ритма в процессе умеренной психической нагрузки.

Диагностика функциональных классов "Норма" и "Норма с преобладанием симпатической активности" может быть полезна при оценке эффектов различных психотерапевтических воздействий, включая сеансы психологической релаксации [Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001].

3. Функциональный класс "Эмоциональное возбуждение" ( $SDNN_n$  5÷9,  $b_{1n}$  5÷9,  $M_n$  5÷9) - высокий общий тонус ВНС, преобладание активности надсегментарного уровня регулирования сердечного ритма, преобладание вагусной

сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса диагностируются при эмоциональном возбуждении в ситуации ожидания выполнения ответственного задания, а также по его окончанию.

4. Функциональный класс "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" ( $SDNN_n$  5÷9,  $b_{1n}$  5÷9,  $M_n$  1÷4) - высокий общий тонус ВНС, преобладание активности надсегментарного уровня регулирования сердечного ритма, преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса диагностируются у лиц с невротической симптоматикой, когда эмоциональное возбуждение сопровождается выраженными психическими переживаниями по поводу конфликтной ситуации [Машин В.А. и др., 1997; Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000]. Данный функциональный класс может диагностироваться и в ситуации ожидания ответственного задания, и после его выполнения.

Различные формы эмоционального возбуждения оператора в процессе выполнения профессиональных задач могут быть вызваны также его ошибочными действиями и возникшими проблемами (А.А.Меденков, П.В.Симонов, D.A.Norman и др.). Характерная для различных форм эмоционального возбуждения динамика показателей ВСР подтверждается многочисленными исследованиями (А.В.Дворников, В.М.Зациорский, J.Aasman и др.).

5. Функциональный класс "Психическое напряжение" ( $SDNN_n$  1÷4,  $b_{1n}$  5÷9,  $M_n$  1÷4) - сниженный общий тонус ВНС, преобладание активности надсегментарного уровня регулирования сердечного ритма, преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса типичны для психической нагрузки и отражают разные степени психического напряжения и концентрации усилий субъекта на задаче (D.De Waard, D.Meister, R.D.O'Donnell и др.).

6. Функциональный класс "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" ( $SDNN_n$  1÷4,  $b_{1n}$  5÷9,  $M_n$  5÷9) - сниженный общий тонус ВНС,

преобладание активности надсегментарного уровня регулирования сердечного ритма, преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса характерны для психического утомления с астено-невротической симптоматикой (что согласуется с данными R.McCraty и S.A.Sisto), а также, согласно клиническим наблюдениям, могут служить индикаторами патологических процессов и вызванных ими ипохондрических мыслей (снижение функциональных резервов организма и рост невротических реакций при развитии таких тяжелых заболеваний, как, например, атеросклероз, рак).

7. Функциональный класс "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур" ( $SDNN_n 1\div 4$ ,  $b_{1n} 1\div 4$ ,  $M_n 1\div 4$ ) - сниженный общий тонус ВНС, преобладание активности сегментарного уровня регулирования сердечного ритма над корково-лимбическим, преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Согласно клиническим наблюдениям, данный функциональный класс может являться ранним предвестником сердечно-сосудистых заболеваний (например, нарушений сердечного ритма). При выраженном снижении общего тонуса ВНС на ритмограмме регистрируется парадоксальный низкоамплитудный высокочастотный хаос.

8. Функциональный класс "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур" ( $SDNN_n 1\div 4$ ,  $b_{1n} 1\div 4$ ,  $M_n 5\div 9$ ) - сниженный общий тонус ВНС, преобладание активности сегментарного уровня регулирования сердечного ритма над корково-лимбическим, преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Функциональные состояния данного класса характерно для хронического психического утомления, глубокого снижения функциональных резервов.

Принципиальное отличие первых четырех функциональных классов от различных форм психического напряжения заключается в высоком общем тоне ВНС. Характеризуя первые четыре функциональных класса, мы имеем в виду не только преобладание активности различных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма (высокие относительные значения показателей

ВСП), но и их высокую тоническую активность (высокие абсолютные значения показателей ВСП). Для различных форм психического напряжения общий тонус ВНС снижен, как и тоническая активность различных структур головного мозга (низкие абсолютные значения показателей ВСП), активность которых преобладает в регуляции сердечного ритма (высокие относительные значения показателей ВСП).

Согласно нашей классификации функциональные классы "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур" могут рассматриваться как индикаторы процессов психического утомления. Процедура наших экспериментальных исследований не позволяла моделировать длительных психических нагрузок у операторов для изучения процессов утомления (E.Grandjean, G.R.Hockey, G.Kecklund и др.) и монотонии (В.С.Генес, А.А.Генкин, Р.Вратон и др.). Но выполненный нами аналитический обзор многочисленных исследований этих негативных состояний (Р.М.Баевский, В.Ф.Галыгин, J.L.Andreassi и др.) высветил проблему их дифференциальной диагностики. Согласно нашему анализу, в состоянии монотонии у операторов можно наблюдать две различные копинг-стратегии: (1) снижение активности, бдительности, сонливость, дремота; (2) волевые усилия для сохранения необходимого уровня активности и бдительности в ситуации однообразной деятельности. Мы полагаем, что первая копинг-стратегия будет характеризоваться функциональным классом "Норма", а вторая – функциональным классом "Психическое напряжение". При необходимости длительное время поддерживать нужный уровень активности и бдительности в ситуации монотонии, у операторов могут развиваться состояния психического утомления - функциональные классы "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур" (снижение общего тонуса ВНС с преобладанием вагусной сердечной активности). С этих позиций мы проанализировали в своей работе противоречивость

динамики показателей ВСР, которая наблюдается в результатах исследований процессов утомления и монотонии.

При разработке классификации функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР мы специально обратили внимание на то, что речь идет именно о функциональных классах, а не функциональных состояниях [Машин В.А., 2007b]. В каждом функциональном классе мы имеем непрерывный континуум функциональных состояний в диапазоне, который задается минимальными и максимальными значениями нормированных показателей трехфакторной модели ВСР. Например, функциональный класс "Норма" (диапазон  $1 \div 12$ ) может содержать такие различные функциональные состояния как покой, глубокое расслабление, глубокий сон и т.д. (трофотропная деятельность по А.М. Вейну). Согласно трехфакторной модели ВСР, все эти функциональные состояния объединяет: высокий общий тонус ВНС, преобладание активности сегментарных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма и вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе. При этом функциональные состояния в рамках одного функционального класса имеют различную выраженность, которая оценивается через значения нормированных показателей трехфакторной модели ВСР ( $SDNN_n$ ,  $b_{1n}$  и  $M_n$ ). Последующие экспериментальные исследования должны были подтвердить полученную нами классификацию функциональных состояний.

Перед экспериментальными исследованиями влияния психических нагрузок на функциональные состояния человека, дополнительно мы рассмотрели ряд методических вопросов, связанных с использованием трехфакторной модели ВСР: стационарность и длительность анализируемого временного ряда R-R интервалов [Машин В.А., 2007a; Mashin V.A., 2007]. Данные методические вопросы являются существенными при регистрации сердечного ритма в реальных условиях и при кратковременных изменениях психической нагрузки (Р.М.Баевский, Э.Ллойд, М.Малик и др.). Противоречивость взглядов на проблему стационарности (Р.М.Баевский, В.В.Копаев, G.G.Berntson и др.) подтолкнуло нас проанализировать влияние фактора нестационарности на диагно-

стику функциональных классов [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007]. Диагностика функциональных классов выполнялась с помощью рассмотренной выше трехфакторной модели ВСР при различных условиях регистрации ЭКГ: в положении лежа (покой), перед выполнением ответственного задания (тест Шульте-Горбова), после выполнения задания. Для всех трех условий нами была получена высокая устойчивость диагностирования классов функциональных состояний к действию фактора нестационарности. Дополнительно был исследован эффект нестационарности на широкий спектр показателей ВСР. Было установлено, что фактор нестационарности значимо влияет на показатели, связанные с очень низкочастотными характеристиками спектра мощности ритма сердца. Поэтому для корректного сравнения данных двух исследований, в которых анализируются очень низкочастотные характеристики и связанные с ними показатели ВСР, необходимо контролировать не только выборку обследуемых и условия регистрации ритма сердца, но и эффект нестационарности временных рядов.

Другим вопросом, который мы рассмотрели, была длительность анализируемого временного ряда. Как правило, в методических рекомендациях стандартная длительность кратковременных записей составляет 5 минут (Р.М.Баевский, М.Малик). Но в реальности особенности исследовательской программы (скоротечность вызываемых функциональных состояний) или ограничения регистрирующих приборов (продолжительности записи физиологического сигнала) требуют от исследователя анализировать более короткие сегменты ЭКГ (J.M.Dekker, D.Singh). Этот вопрос является исключительно важным для разработок адаптивной автоматики (L.J.Prinzel 3rd.), но число исследований в этом направлении крайне ограничено (J.McNames, J.E.Richards, T.Thong). Учитывая значение использования коротких записей ЭКГ в реальных экспериментальных программах мы изучили возможность диагностики функциональных классов с помощью трехфакторной модели ВСР на временных рядах короче 256 R-R интервалов:  $128 \div 16$  R-R. Также мы исследовали эффект длительности вре-

менного ряда на отдельные показатели ВСР [Машин В.А, 2007а; Mashin V.A., 2007].

Полученные статистические данные позволили заключить, что диагностику функциональных классов на основе трехфакторной модели ВСР можно использоваться как на стандартных по объему выборках (256 R-R интервалов), так и на более коротких выборках в диапазоне  $128 \div 32$  R-R интервала, с предварительной нормализацией факторных показателей для соответствующей длины временного ряда.

#### **Глава 4. Использование трехфакторной модели вариабельности сердечного ритма в психологических исследованиях**

В экспериментальной части нашего исследования мы воспользовались разработанной нами классификацией функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР, в первую очередь, для решения актуальной задачи профессионального отбора – определение психофизиологических критериев для прогнозирования эмоциональной устойчивости кандидатов на оперативные должности [Машин В.А., Машина М.Н., 2004]. Большинство отечественных авторов определяют эмоциональную устойчивость как свойство личности, которое характеризуется взаимодействием эмоциональных, волевых, интеллектуальных и мотивационных компонентов психической деятельности индивида, обеспечивая достижение цели деятельности в сложной обстановке (Л.М.Аболин, М.И.Дьяченко, П.Б.Зильберман и др.).

Общепринято считать, что эмоциональная устойчивость является одним из важных факторов надежности и эффективности действий оператора в условиях воздействия эмоционального компонента психической нагрузки (Ю.В.Бушов, Н.Н.Данилова, М.И.Дьяченко и др.). Проведены многочисленные исследования эмоциональной устойчивости у спортсменов (Л.М.Аболин, В.М.Писаренко, В.А.Плахтиенко и др.). При этом число экспериментальных исследований, посвященных эмоциональной устойчивости операторов, крайне ограничено (В.С.Генес, Ф.Д.Горбов, Х.Ф.Лиу и др.). Значительное число иссле-

дований было выполнено для оценки динамики ВСР при воздействии различных эмоциональных компонентов психической нагрузки (О.В.Коркушко, S.D.Calkins, N.A.Fox и др.).

Разработка эффективных методов оценки эмоциональной устойчивости является одной из важнейших задач отбора кандидатов на оперативные должности (Е.А.Милерян). Для ее решения мы воспользовались разработанной нами трехфакторной моделью ВСР и созданной на ее основе классификацией функциональных состояний [Машин В.А., Машина М.Н., 2004]. В качестве независимого критерия уровня эмоциональной устойчивости кандидатов были использованы экспертные оценки. Эмоциональный компонент психической нагрузки моделировался тестом Шульте-Горбова: регистрация показателей ВСР выполнялась в процессе выполнения наиболее сложного третьего задания. В анализе использовался также суммарный показатель эффективности выполнения методики по всем трем заданиям. С помощью "обучающей" выборки были выделены психофизиологические критерии по каждому функциональному классу для прогнозирования устойчивости к эмоциональным нагрузкам кандидатов. На заключительной стадии алгоритм диагностики уровня эмоциональной устойчивости, с учетом функциональных классов и выделенных психофизиологических критериев, был использован для проверки на "контрольной" выборке кандидатов. Показатель чувствительности (Se) использованного алгоритма для диагностики низкого уровня устойчивости к эмоциональным нагрузкам составил 92%, а специфичности (Sp) – 93%, прогностичность положительного результата  $PVP = 81\%$ , прогностичность отрицательного результата  $PVN = 97\%$ . Выполненный статистический анализ позволил сделать вывод о высокой статистически значимой связи между оценками экспертов и данными психофизиологической диагностики эмоциональной устойчивости кандидатов на оперативные должности.

Наши исследования также показали, что диагностирование функциональных классов "Норма" и "Норма с преобладанием симпатической активности" в процессе воздействия психических нагрузок, когда наблюдается низкая надеж-

ность и эффективность деятельности, и когда отсутствуют объективные условия для развития монотонии и снижения активности оператора, может служить индикатором низкой мотивации субъекта при решении профессиональных задач.

Разработанный алгоритм диагностики эмоциональной устойчивости кандидатов на оперативные должности был использован нами в создании системы профессионального отбора персонала АЭС [Машин В.А., Машина М.Н., 2005] и апробирован при отборе персонала как для отечественных АЭС (концерн "Росэнергоатом"), так и зарубежных АЭС: "Тяньвань" (Китай), "Куданкулам" (Индия) и "Бушер" (Иран). Данная процедура легла в основу разработанных в 2006 году для ОАО АК Транснефть "Общих требований к психофизиологической оценке оперативного, диспетчерского и оперативно-ремонтного персонала".

В первой главе своей работы мы дали развернутое описание исследований, в которых показатели ВСП использовались для анализа различных видов психических нагрузок. Неоспоримым можно считать интерес исследователей к показателям ВСП как индикаторам психической нагрузки при выполнении индивидуумами моделируемых или реальных задач. В тоже время нельзя обойти стороной и те противоречия в результатах исследований функциональных состояний при воздействии психических нагрузок, которые были рассмотрены ранее. В следующем экспериментальном исследовании мы попытались с помощью трехфакторной модели ВСП проанализировать индивидуальную динамику показателей ВСП при воздействии различных уровней психической нагрузки и роль гетерогенности при объяснении противоречивости данных о влиянии рабочей нагрузки на показатели ВСП. Дополнительно мы собирались оценить чувствительность отдельных показателей ВСП к воздействию различных уровней психической нагрузки с учетом нашей классификации функциональных состояний [Машин В.А., 2007с].

С помощью методики Шульте-Горбова моделировались два уровня психической нагрузки: умеренный (первые два задания) и высокий (третье зада-

ние). Кроме этого сердечный ритм регистрировался в исходном состоянии – до выполнения тестовых заданий. При оценке согласия между частотой диагностируемых функциональных классов при различных уровнях психической нагрузки были получены статистически значимые различия всех трех заданий с исходным уровнем, а также первых двух заданий (умеренный уровень психической нагрузки) с третьим (высокий уровень психической нагрузки). Частота диагностируемых функциональных классов при выполнении первых двух заданий статистически не различалась.

Исходное состояние (перед началом выполнения тестовой методики) характеризовалось значительной частотой диагностирования функциональных классов "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности". 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" в исходном состоянии. С началом выполнения первого задания (умеренная психическая нагрузка) наблюдалось снижение частоты диагностирования классов функциональных состояний, связанных с эмоциональным возбуждением, и рост классов функциональных состояний, связанных с психическим напряжением. Такая же картина сохранялась и при выполнении второго задания. Переход к выполнению третьего задания, с высоким уровнем психической нагрузки, привел к возрастанию частоты диагностирования функциональных классов, связанных с эмоциональным возбуждением, при сохранении частоты диагностирования функциональных классов, отражающих психическое напряжение. Рост частоты диагностирования функциональных классов, связанных с эмоциональным возбуждением, отражает тревожно-эмоциональные реакции обследуемых на возросшую сложность задачи и вероятность совершения ошибок.

Пестрая картина изменений функциональных классов при воздействии различных уровней психической нагрузки была отмечена и для индивидуаль-

ной динамики. Поэтому для оценки чувствительности отдельных показателей ВСП к различным уровням психической нагрузки были сформированы две группы, которые характеризовались устойчивыми функциональными классами при выполнении всех трех заданий методики Шульте-Горбова: (1) "Эмоциональное возбуждение" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности", (2) "Психическое напряжение". В ходе анализа результатов для каждой группы были выделены показатели ВСП, обладающие дифференциальной чувствительностью и абсолютной чувствительностью.

Заключительная часть наших экспериментальных исследований классификации функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСП была посвящена изучению состояний тревожности у операторов [Машин В.А., 2007d]. Нами был выполнен аналитический обзор исследований клинических (Н.Б.Хаспекова, Т.Д.Ворковец, Н.Сохен и др.) и неклинических форм тревожности (Н.Н.Данилова, А.А.Завьялов, О.В.Вазхенова и др.) с помощью методов ВСП. Исследования, в которых бы учитывался фактор антиципации - предвосхищения будущих событий (Ю.В.Щербатых, М.Вронис, В.Ф.Фуллер и др.), представляли для нас особый интерес. Были отмечены противоречия в результатах различных исследований и пестрота используемых показателей ВСП для изучения тревожных состояний.

С помощью трехфакторной модели мы проанализировали функциональные классы и динамику показателей ВСП на стадиях антиципации и восстановления после теста Шульте-Горбова. Поскольку сама ситуация профессионального отбора не могла не повлиять на состояния обследуемых, предварительно (исходная стадия исследования) были отобраны кандидаты, у которых до начала проведения тестовых испытаний по данным трехфакторной модели ВСП диагностировались функциональные состояния класса "Норма".

Как и ожидалось, наибольшее число классов функциональных состояний на стадиях антиципации и восстановления составили различные формы эмоционального возбуждения. Между этими стадиями, согласно статистическому анализу, отсутствовали различия в частоте диагностированных функциональ-

ных классов. Дополнительно мы проанализировали различия показателей ВСП между функциональными классами. Нами было продемонстрировано, насколько значимо могут отличаться индивидуальные значения показателей ВСП в тревожных ситуациях даже при наличии единых исходных функциональных состояний. Такая гетерогенность индивидуальной динамики показателей ВСП может служить объяснением тех противоречий, которые содержат результаты исследований тревожных состояний.

Функциональный класс "Психическое напряжение" также диагностировался нами при моделировании тревожных состояний, хотя частота диагностирования в этом случае была значимо ниже, чем в предыдущих исследованиях. Какую же роль играет этот функциональный класс в ситуации ожидания ответственного задания? Анализ теоретических и экспериментальных исследований позволил нам сделать следующие предположения. Если при эмоциональном возбуждении рост активности надсегментарных структур головного мозга в регулировании сердечного ритма сопровождается сохранением повышенного общего тонуса ВНС, то при психическом напряжении – его снижением. В первом случае высокий тонус активности ЦНС обеспечивает гибкую мобилизацию нервных ресурсов организма и быструю подстройку его функциональных систем для решения возникшей проблемы (В.Н.Friedman, J.F.Thayer; мобилизационная фаза эрготропной деятельности). При психическом напряжении мы имеем дело с состояниями, когда нервные ресурсы организма уже мобилизованы, и функциональные системы организма оптимизированы для выполнения текущей задачи: общий вегетативный тонус снижен и все основные ресурсы ЦНС направлены на обеспечение когнитивных функций (исполнительная фаза эрготропной деятельности).

В своей монографии G.G.Berntson и J.T.Cacioppo предположили, что если когнитивно-опосредованные тревожные реакции имеют зависимость от кортикальных (надсегментарных) структур головного мозга, то элементарные реакции страха могут опосредоваться лишь сегментарными структурами (симпатическими и парасимпатическими вегетативными ядрами ствола головного мозга

и спинного мозга). Построенная нами классификация функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР не подтверждает эту гипотезу. Преобладание активности сегментарных структур головного мозга в управлении сердечным ритмом (низкие значения показателя  $b_1$ ) характеризуется, согласно нашей классификации, например, функциональным классом "Норма" и достигает максимальных значений при глубоком расслаблении и во время сна. В то же время моделирование ситуации тревожного ожидания выполнения ответственного задания позволило нам диагностировать три основных класса функциональных состояний: "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" и "Психическое напряжение". И все три функциональные классы характеризуются преобладанием активности надсегментарных структур головного мозга в регулировании сердечного ритма. Но если эмоциональное возбуждение можно рассматривать как "вхождение" субъекта в проблемную ситуацию (подготовка, мобилизация – высокий тонус ВНС), то психическое напряжение - как "включенность" субъекта в проблемную ситуацию, готовность действовать (тонус ВНС снижен). Мы выдвинули предположение, что состояния тревожности характеризуются различными формами эмоционального возбуждения ("Эмоциональное возбуждение" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности") [Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000], а состояния страха – функциональным классом "Психическое напряжение" [Машин В.А., 2007b]. Существуют результаты исследований, которые могут служить подтверждением нашей гипотезы (В.М.Зациорский, Н.Б.Хаспекова, Н. Inagaki и др.). Но данное предположение требует дополнительного анализа и решения методических вопросов моделирования состояний страха и тревоги. Мы полагаем, что использование трехфакторной модели ВСР при исследовании тревожных состояний дает исследователям возможность для дифференцированной диагностики состояний эмоционального возбуждения и психического напряжения, с последующим анализом их психологического и психофизиологического содержания.

Исследуя динамику функциональных состояний на стадии антиципации, мы не могли не обратить внимания на преобладание различных форм эмоционального возбуждения ("Эмоциональное возбуждение" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности") и на стадии восстановления. Наши результаты совпали с данными исследований, изучавшими пост-стрессовые размышления, переживания (руминацию), в которых доказывалось, что тревожные состояния и связанные с ними изменения в ВСП могут продуцироваться кортикально-когнитивными процессами не только в ситуации ожидания стрессовых заданий, но и после их выполнения (Т.Е. Earle, А. Ehlers, L.M. Glynn и др.). Именно этим можно объяснить значительный рост различных форм эмоционального возбуждения на стадии восстановления после выполнения теста.

Дополнительно мы исследовали связь шкал опросника ММРІ, отражающих различные формы тревожности, с функциональными классами, диагностированными на стадиях до и после выполнения тестовых заданий. На этих стадиях эксперимента повышение по шкалам ММРІ соответствовало, главным образом, различным формам эмоционального возбуждения. Анализируя полученные результаты, мы сделали вывод, что данные ММРІ хорошо согласуются с трехфакторной моделью ВСП на стадиях антиципации (тревожных размышлений и переживаний перед выполнением ответственных тестовых заданий) и восстановления (тревожных размышлений и переживаний после выполнения ответственных тестовых заданий).

**В заключении** обобщаются результаты теоретического и экспериментального анализа функциональных состояний человека-оператора трехфакторной моделью ВСП. Они позволяют сделать следующие выводы:

1. Современные автоматизированные системы управления высокотехнологичными процессами требуют обеспечения надежности человека-оператора, как важнейшего звена подобных систем. Повышение надежности и сложности оборудования, увеличение доли автоматизации в управлении системами сопровож-

даются ростом негативного влияния человеческого фактора в возникновении и развитии внештатных и аварийных ситуаций.

2. Идея контроля и управления функциональным состоянием оператора в процессе его реальной деятельности для обеспечения его надежности лежит в основе разработок адаптивных автоматизированных систем, гибко изменяющих психическую нагрузку на оператора в соответствии с его состоянием. Кроме этого диагностика функционального состояния помогает оценить эффективность обучения операторов, эффективность эргономических модернизаций оборудования и систем управления, эффективность профилактических мероприятий после длительных психических нагрузок.

3. На сегодняшний день накоплен значительный материал по оценке функциональных состояний человека-оператора с помощью психофизиологических критериев. При этом методы ВСП можно отнести к наиболее перспективным. Их отличает простота использования оборудования для регистрации ВСП, разработанный математический аппарат анализа показателей, возможность длительное время непрерывно регистрировать ритм сердца без вмешательства в деятельность человека, чувствительность показателей ВСП к кратковременным изменениям в психической нагрузке.

4. Многочисленные исследования функциональных состояний человека при воздействии различных психических нагрузок с помощью показателей ВСП поставили перед учеными ряд методологических и методических вопросов. До сих пор отсутствует общепринятая физиологическая интерпретация различных показателей ВСП. Выбор отдельных показателей из многочисленного набора переменных, выражающих ВСП, для экспериментальных задач зачастую никак не обосновывается и отражает лишь субъективные предпочтения исследователей. Накапливаются противоречия при сравнении результатов различных исследований, отражающие разнонаправленную динамику показателей ВСП при оценке одних и тех же феноменов.

5. Согласно нашим исследованиям, в многообразии показателей ВСП можно выделить трехфакторную структуру, в которой первый фактор отра-

жает общий тонус ВНС, второй характеризует баланс активности надсегментарных и сегментарных отделов ВНС в регулировании сердечного ритма, третий выражает баланс активности симпатического и парасимпатического отделов ВНС (сегментарный уровень) в регулировании ритма сердца.

6. С помощью трехфакторной модели ВСП можно описать 8 классов функциональных состояний человека, которые характеризуются различной динамикой нормированных факторных показателей: "Норма", "Норма с преобладанием симпатической активности", "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности", "Психическое напряжение", "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса", "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур", "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур".

7. Предложенная классификация функциональных состояний позволяет, согласно полученным нами результатам, выделить психофизиологические критерии для прогнозирования устойчивости кандидатов на оперативные должности к эмоциональным компонентам психической нагрузки, предложить физиологические критерии для дифференциальной диагностики снижения активности и бдительности при монотонии и функциональных резервов при психическом утомлении. Она предоставляет исследователям возможность приблизиться к психофизиологическим основаниям для различения функциональных состояний тревоги и страха. Мы полагаем, что классификация функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСП будет полезна при диагностике различных психических расстройств и оценке эффективности терапевтических воздействий.

8. Проведенная нами серия экспериментальных исследований подтвердила высокую гетерогенность индивидуальных показателей ВСП и диагностированных с помощью трехфакторной модели ВСП функциональных классов как в исходном состоянии, так и при воздействии различных уровней психической нагрузки и тревожных состояний. Такая гетерогенность может являться суще-

ственным источником расхождения результатов экспериментальных исследований эффектов психических нагрузок и тревожных состояний на динамику показателей ВСП. Разработанная на основе трехфакторной модели ВСП классификация функциональных состояний может служить ценным инструментом для контроля и учета гетерогенности индивидов. Она может быть полезна при управлении психическими нагрузками в реальных условиях деятельности оператора, позволяя отслеживать такие негативные состояния как психическое перенапряжение и эмоциональное перевозбуждение, монотония и психическое утомление.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях автора:

1. Машин В.А. О двух уровнях личностной регуляции поведения человека. Вопросы психологии, 1994а, № 3, с. 144-149.
2. Машин В.А. О психологической проблеме эксплуатации и управления АЭС. Электрические станции, 1994b, № 3, с. 36-39.
3. Машин В.А. Профессионализация личности в зрелом возрасте (На материале деятельности операторов АЭС). Автореф. дисс. канд. психол. наук. М., МГУ, 1994с, 24 с.
4. Машин В.А. Компьютеризованные системы поддержки операторов АЭС (Психологические проблемы). Электрические станции, 1995, № 7, с. 2-7.
5. Машин В.А., Никитин В.П. Концепция культуры безопасности. Человеческий фактор. Электрические станции, 1997, № 4, с. 18-22.
6. Машин В.А., Машина М.Н., Шмелева И.А. Психофизиологические исследования эмоциональной лабильности. Вопросы психологии, 1997, № 4, с. 95-103.
7. 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. 48-54.
8. Машин В.А. Микроструктурный анализ вариабельности сердечного ритма при моделировании деятельности оператора в процессе психофизиологических

обследований. В сб.: Человеческий фактор и ядерная безопасность (Human factors and nuclear safety). Материалы Междун. научн.-практ. конф. 24-26 окт. 2000. Обнинск, Изд-во ОНИЦ "Прогноз", 2001, с. 147-148.

9. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ вариабельности ритма сердца как инструмент контроля и оценки эффективности методов психологической релаксации. Вопросы психологии, 2001, № 1, с. 72-81.

10. Машин В.А. Анализ вариабельности сердечного ритма с помощью метода графа. Физиология человека, 2002а, Т. 28, № 4, с. 63-73.

11. Машин В.А. Зависимость показателей вариабельности сердечного ритма от средней величины R-R интервалов. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2002б, Т. 88, № 7, с. 851-855.

12. Машин В.А. Залежність показників варіабельності серцевого ритму від середньої величини RR-інтервалів. Вісник Харківського Національного Університету ім. В.Н. Каразіна, Серія "Медицина", 2002, Випуск 3, № 545, с. 40-44.

13. Машин В.А., Машина М.Н. Анализ вариабельности сердечного ритма с помощью метода графа при различных функциональных состояниях. Вопросы психологии, 2002а, № 2, с. 99-111.

14. Машин В.А., Машина М.Н. Факторный анализ показателей графа сердечного ритма для диагностики различных функциональных состояний и оценки стрессоустойчивости. В сб.: Труды психологической службы в атомной энергетике и промышленности. Том 1. Обнинск: Изд-во ОНИЦ "Прогноз", 2002б, с. 82-88.

15. Машин В.А., Машина М.Н. Классификация функциональных состояний и диагностика психоэмоциональной устойчивости на основе факторной структуры показателей вариабельности сердечного ритма. Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова, 2004, Т. 90, № 12, с. 1508-1521.

16. Машин В.А., Машина М.Н. Процедура профессионального отбора на оперативные должности (На материале отбора персонала для АЭС). Вопросы психологии, 2005, № 3, с. 52-56.

- 17.Машин В.А. Связь тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма с периодической и нелинейной динамикой ритма сердца на коротких стационарных отрезках. *Биофизика*, 2006, Т. 51, № 3, с. 534-538.
- 18.Машин В.А. Нестационарность и длительность временного ряда сердечного ритма при диагностике функциональных состояний. *Биофизика*, 2007а, Т. 52, № 2, с. 344–354.
- 19.Машин В.А. Психическая нагрузка, психическое напряжение и функциональное состояние операторов систем управления. *Вопросы психологии*, 2007b, № 6, с. 86-96.
- 20.Машин В.А. Трехфакторная модель вариабельности сердечного ритма. Часть 1: Исследование психических нагрузок при моделировании операторской деятельности. *Труды психологической службы в атомной энергетике и промышленности. Том. 3. Обнинск: Изд-во ИГ-СОЦИН*, 2007с, с. 181-189.
- 21.Машин В.А. Трехфакторная модель вариабельности сердечного ритма. Часть 2: Исследование тревожных состояний при моделировании операторской деятельности. *Труды психологической службы в атомной энергетике и промышленности. Том. 3. Обнинск: Изд-во ИГ-СОЦИН*, 2007d, с. 190-198.
- 22.Mashin V.A., Mashina M.N. Analysis of the heart rate variability in negative functional states in the course of psychological relaxation sessions. *Human Physiology*, 2000, V. 26, No 4, p. 420-425.
- 23.Mashin V.A. Analysis of Heart Rate Variability Based on the Graph Method. *Human Physiology*, 2002, V. 28, No 4, p. 437-447.
- 24.Mashin V.A. The Relationship of the Slope of the Heart Rate Graph Regression with Linear and Nonlinear Heart Rate Dynamics in Stationary Short-time Series. *Biophysics*, 2006, V. 51, No 3, p. 471-479.
- 25.Mashin V.A. Nonstationarity and Duration of the Cardiac Interval Time Series in Assessing the Functional State of Operator Personnel. *Biophysics*, 2007, V. 52, No 2, p. 241–247.