

## ВВЕДЕНИЕ

### 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 [Alexandersson E., 2003; Hobbs A., Williamson A., 2003; Isaac A. et al, 2003; Kumar U., Malik H., 2003; Leveson N., 2004]. 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 [Машин В.А., 1995; Air Traffic Services, 1996; Amalberti R., 1998; Haight J.M., Кесоjevic V., 2005; Kantowitz B.H., Campbell J.L. 1996; Safety Regulation Group, 2002]. Состояния монотонии, психического перенапряжения, утомления являются реальными источниками снижения эффективности и надежности деятельности операторов [Brookhuis K.A. et al., 2003; De Waard D., 1996; Rueb J. et al., 1992].

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: при значимо высоких уровнях психического напряжения часть функций оператора берет на себя автоматика, при значимом снижении активности оператора (включенности его в задачу) автоматика возвращает часть функций управления системой человеку [Byrne E.A., Parasuraman R., 1996; Kramer A.F., 1991; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Schmidt G., Monfill G.E., 1995; Tattersall A.J.,

Hockey G.R., 1995].

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, вариабельность сердечного ритма), согласно многочисленным авторам, оцениваются как одни из наиболее перспективных [Fahrenberg J., Wientjes C.J.E., 2000; Farmer E., Brownson A., 2003; Monitoring metabolic status, 2004; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003]. Основаниями для такого вывода стали простота использования оборудования для регистрации вариабельности сердечного ритма, разработанный математический аппарат анализа показателей, возможность длительное время непрерывно регистрировать ритм сердца без вмешательства в деятельность человека, чувствительность показателей вариабельности сердца к кратковременным изменениям в психической нагрузке [Scerbo M.W. et al., 2001; Wierwille W.W., Eggemeier F.T., 1993; Wilson G.F., 2001].

В действительности, в последнее десятилетие отмечается бурный рост прикладных исследований, в которых используется анализ вариабельности сердечного ритма. Можно отметить клиническое направление (оценка факторов риска, влияющих на здоровье человека, исследование и прогноз различных болезненных состояний) [Баевский Р.М., Берсенева А.П., 1997; Huikuri H.V. et al., 1999; Van Leeuwen P., Bettermann H., 2000], задачи фармакологии (оценка действий лекарств на вегетативную нервную систему больного) [Гуревич М.В. и др., 2002; Scheinin H. et al., 1999; Slaap B.R. et al., 2002], психотерапии (оценка психотерапевтических воздействий на человека, исследование широкого спектра психических нарушений и расстройств, включая шизофрению, депрессию, фобии, тревожные состояния, психозы и неврозы) [Гизатуллин Р.Х. и др., 1998; Beauchaine T.P., et al., 2007; Bettermann H. et al., 2002; Cohen H. et al., 1999; Gorman J.M., Sloan R.P., 2000; Rottenberg J., 2007], эргономики и инженерной психологии (оценка взаимодействия автоматизированных систем управления и

человека, роль внешних и внутренних факторов на системы регуляции сердечным ритмом, контроль и управления психическими нагрузками) [Dussault C. et al., 2004; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003; van Driel C.J.G., van Arem B., 2006], и психофизиологии (личностные особенности, высшие психические функции, профессиональный отбор) [Коркушко О.В. и др., 1991; Машин В.А. и др., 1997; Машин В.А., Машина М.Н., 2005; Hansen A.L. et al., 2003; Sakuragi S., Sugiyama Y., 2004; Vincent A. et al., 1996].

В тоже время многочисленные исследования с использованием показателей variability сердечного ритма высветили ряд методологических и методических проблем [Farmer E., Brownson A., 2003; Kramer A.F., 1991; Lenneman J.K., Backs R.W., 2003]. До сих пор отсутствует общепринятая физиологическая интерпретация различных показателей variability сердечного ритма. Выбор отдельных показателей из многочисленного набора переменных, выражающих variability сердечного ритма, для экспериментальных задач зачастую никак не обосновывается и отражает лишь субъективные предпочтения исследователей. Накапливаются противоречия при сравнении результатов различных исследований, отражающие разнонаправленную динамику показателей variability сердечного при оценке одних и тех же феноменов [Gotlib I.H., Hammen C.L., 1992; Moser M. et al., 1998].

Исследователи приходят к пониманию необходимости контроля и учета при регистрации и анализе variability сердечного ритма таких факторов, как возраст, пол, дыхание, речь, движения, мотивация, содержание задачи [Cherri C. et al., 2004; Poyhonen M. et al., 2004; Reilly K.J., Moore C.A., 2003; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1993]. Другим важным фактором выступает гетерогенность индивидов относительно исходного уровня и динамики показателей variability сердечного при различных воздействиях [Kamarck T.W., Lovallo W.R., 2003; Lovallo W.R., Gerin W., 2003]. Для изучения разнообразных психологических феноменов исследователи все чаще используют не упрощенные статистические связи, а сложный аппарат многомерного статистическо-

го анализа [Allen J.J.B. et al., 2007; Christie I.C., 2002; Friedman B.H., Santucci A.K., 2003; Nyklicek I. et al., 1997]. При этом возрастают требования к корректности применения тех или иных статистических методов.

**Объект исследования** – деятельность операторов в условиях воздействия 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 вариабельности сердечного ритма 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 вариабельности сердечного ритма и перейти от исходного обширного набора переменных к небольшому числу наиболее информативных показателей, описывающих регуляцию ВСР с помощью трехфакторной модели.

2. Трехфакторная модель вариабельности сердечного ритма позволяет классифицировать функциональные состояния человека на основе динамики показателей вариабельности сердечного ритма в трехмерном пространстве регуляции сердечного ритма.

3. Трехфакторная модель вариабельности сердечного ритма предоставляет возможность прогнозировать эмоциональную устойчивость операторов в критических ситуациях и анализировать эффекты психической нагрузки на

надежность действий оператора с учетом таких негативных 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 вариабельности сердечного ритма.

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

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

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

6. Проанализировать факторную структуру вариабельности сердечного ритма по показателям временной и частотной областей, а также графа сердечного ритма для определения наиболее информативных показателей при оценке функциональных состояний оператора.

7. Установить и экспериментально обосновать классификацию функциональных состояний оператора на основе факторной модели вариабельности сердечного ритма для определения классов функциональных состояний, влияющие на надежность действий оператора при воздействии психических на-

грузок.

**Методологические основания исследования:** принцип детерминизма поведения человека и психических явлений; принцип единства психических и физиологических процессов, развитый в работах И.М. Сеченова [1947], Л.С. Выготского [1982], С.Л. Рубинштейна [1946] и А.Н. Леонтьева [1983]; концепция В.В. Парина и Р.М. Баевского, согласно которой анализ физиологических механизмов регуляции сердечного ритма дает возможность получить информацию о функциональном состоянии всего организма [Парин В.В. и др., 1967]; принцип векторного кодирования в психофизиологии, предложенного Е.Н. Соколовым [1995]; модель вегетативного двумерного пространства для регуляции сердечного ритма G.G. Berntson и J.T. Cacioppo [Berntson G.G. et al., 1991], согласно которой, отношения между двумя отделами вегетативной нервной системы (симпатическим и парасимпатическим) не сводятся исключительно к реципрокным; концепция А.М. Вейна [2003] о надсегментарных и сегментарных отделах ВНС; концепция J.E. Thayer и R.D. Lane [2000] 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 вариабельности сердечного ритма (временные и частотные показатели); методы нелинейной динамики; специально разработанный автором для решения задач исследования метод анализа показателей графа сердечного ритма; многомерный статистический анализ для построения факторной структура показателей вариабельности сердечного ритма. Также автором в рамках исследования были разработаны: компьютерная программа для моделирования психической нагрузки оператора различного уровня (MABP.Schulte), компьютерная программа для хранения, редактирования кардиоритмограммы и анализа показателей вариабельности ритма сердца (MABP.DB.HRV), а также компью-

терная программа для моделирования и анализа показателей нелинейной динамики (MABP.Chaos).

**Положения, выносимые на защиту:**

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

2. Трехфакторная модель variability сердечного ритма 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 variability сердечного ритма. Пестрая и дина-

мичная картина функциональных классов на уровне индивидов во время воздействия различных уровней психических нагрузок отражает сложную динамику показателей variability сердечного ритма и позволяет объяснить противоречия в результатах психофизиологических исследований воздействий психических нагрузок.

5. При моделировании состояний тревожности, вызванных антиципацией (предвосхищением выполнения ответственного задания) и руминацией (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 variability ритма сердца.

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

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

Впервые построена классификация функциональных состояний человека на основе трехфакторной модели variability сердечного ритма.

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



Впервые с помощью трехфакторной модели вариабельности сердечного ритма 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 вариабельности сердечного ритма 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 вариабельности сердечного ритма 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 MABP.DB.HRV для анализа широкого спектра показателей вариабельности сердечного ритма, 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 MABP.DB.HRV используется при проведении сеансов ауто-

тренинга и релаксации для 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 объемом выборки испытуемых (референтную группу составили 848 здоровых мужчин, средний возраст 29.84 лет, стандартное отклонение 6.54 лет), 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.