

## ГЛАВА 1.

### АНАЛИЗ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА

#### 1.1. ДИАГНОСТИКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ И ПРО- БЛЕМА НАДЕЖНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Бурный рост высоких технологий, в основе которых лежат автоматизированные системы контроля и управления сложными процессами, высветил проблему надежности человека-оператора, как одного из важнейших элементов таких систем [Alexandersson E., 2003; Greeves C.B., 2002; Helmreich R.L., 2000; Hobbs A., Williamson A., 2003; Isaac A. et al, 2003; Kumar U., Malik H., 2003; Leveson N., 2004; Meshkati N., 1991; Reason J., 2000; Wiegmann D.A., Shappell S.A., 2001; Woods D., Cook R., 1999].

Английский ученый Н.В. Heinrich [1950] одним из первых попытался исследовать роль человеческого фактора в возникновении аварийных ситуаций. В 1928 году он опубликовал результаты анализа 75 тысяч аварий на производстве и установил, что 88% из них были вызваны действиями человека, 10% - условиями окружающей среды, и 2% - "действиями Бога". Дальнейшее развитие промышленного производства и транспорта придало задаче контроля и учета человеческого фактора еще большую актуальность. По мере совершенствования автоматизированных систем управления обозначилась общая тенденция роста доли человеческих ошибок при возникновении аварийных ситуаций. В 1993 году Erik Hollnagel [1993] провел исследование литературы, посвященной роли человеческого фактора в различных отраслях промышленности. Он установил, что в 1960 году, когда к этой проблеме было впервые привлечено серьезное внимание, оценка вклада человеческих ошибок в развитии аварийных ситуаций составляла в среднем около 20%. В 1990 году доля человеческих ошибок возросла в 4 раза и составила 80%. Данную динамику отметили в своей статье также S.A. Shappell и D.A. Wiegmann [1996], которые исследовали различные факторы, повлиявшие на возникновение и развитие нарушений и аварий-

ных ситуаций в морской авиации. Авторы сделали вывод, что за последние 40 лет число нарушений, обусловленных неисправностями оборудования, значительно снизилось, при этом число нарушений, вызванных человеческими ошибками, слабо изменилось. Как следствие, рост доли аварийных ситуаций и нарушений, в которых свою негативную роль сыграл человеческий фактор.

Указанная тенденция подтверждена многочисленными исследованиями. Например, в 1974 году S.T. Lewis [1974], рассмотрев 545 аварий, произошедших в ВВС США, пришел к выводу, что 52% всех аварий были вызваны человеческими ошибками. По данным более поздних исследований [Burin J., 2004; Hecker J.Z. et al., 2004; Helmreich R.L., Foushee H.C., 1993; Nagel D., 1988; O'Hare D. et al., 1994; Wiegmann D.A., Shappell S.A., 1999; Yacavone D.W. et al., 1993; Zhou Y., 2004], человеческие ошибки повлияли на 70-80% нарушений и аварий, произошедших в гражданской и военной авиации. Повышается доля человеческих ошибок и в нештатных событиях на АЭС. Так J.T. Reason [1990], изучив работу 180 АЭС с 1983 по 1984 год, сделал вывод, что в 52% случаев человеческие ошибки являлись коренными причинами развития аварий. Анализ 48 нарушений, которые произошли на АЭС США с 1992 по 1997 год, позволил авторам аналитического обзора [Gertman D.I. et al., 2001] установить, что уже в 62% случаев они были причиной человеческих ошибок.

В 2000 году в докладе на 22-й конференции когнитивного научного общества (США) были представлены сравнительные показатели доли нарушений, обусловленных человеческим фактором, в различных производствах [Zhang J., et al., 2000]. При управлении авиадвижением она составляла 91%, при управлении автомобильным транспортом - 85%, при управлении АЭС (США) - 70%, при управлении реактивными самолетами - 65%. В рамках европейской программы обеспечения безопасности управления воздушным движением было подготовлено сообщение, посвященное моделям человеческой деятельности и классификации человеческих ошибок [Isaac A. et al., 2002]. В нем подчеркивается тот факт, что доля человеческих ошибок в нарушениях для различных отраслей промышленности составляет 90 и более процентов, в атомной энергетике

ке она колеблется от 70 до 90%. Примером могут быть исследования, проведенные в Финляндии [Salminen S., Tallberg T., 1996]. Они позволили установить, что главной причиной от 84 до 94% смертельных и серьезных аварий на промышленных предприятиях были человеческие ошибки. Схожие результаты были получены J. Rasmussen и его коллегами [1987], которые обнаружили, что 88% всех несчастных случаев на производстве были вызваны непосредственно действиями человека.

Многочисленные эксперты сходятся в том, 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. На 56-м международном семинаре всемирного фонда безопасности полетов (проходившем 10-13 ноября 2003 года в Вашингтоне, США), докладчики из Великобритании констатировали, что в настоящее время в 85% авиационных происшествий присутствует элемент "человеческой ошибки", и, похоже, что эта доля не имеет тенденции к сокращению [Courteney H., Newman T., 2003]. Так, согласно Национальному совету по безопасности транспорта США [NTSB, 2004], из 1758 авиационных нарушений, которые произошли с американскими самолетами с 1991 по 2000 год, в 89% основной причиной или сопутствующим фактором были человеческие ошибки. В 86% человеческие ошибки были основной причиной возникновения нарушений. Для сравнения, отказы техники послужили причиной 22% аварий, а условия окружающей среды – 4%.

Специалисты управления гражданской авиацией Англии [Safety Regulation Group, 2002], проанализировали многочисленные аварийные ситуации и выделили ряд причин, которые существенным образом повлияли на рост человеческих ошибок. Так, согласно их выводам, надежность механического и электронного оборудования за прошедшие 30 лет значительно возросла. Важнейшие автоматизированные системы управления и контроля дублируются, и даже трехкратно резервируются (современные аэробусы, АЭС). При этом природа человека осталась неизменной. Служба управления воздушным движением

ем Австралии [Air Traffic Services, 1996] дополнительно подчеркнула возрастающую сложность автоматизированных систем управления и контроля, что увеличивает вероятность конструктивных ошибок, ошибок принятия решения в процессе эксплуатации и ошибок технического обслуживания. Ряд авторов обозначили негативную роль автоматики на эффективность и надежность действий человека оператора [Машин В.А., 1995; Amalberti R., 1998; Haight J.M., Kesocjevic V., 2005; Kantowitz B.H., Campbell J.L. 1996].

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. Состояние монотонии, когда доля автоматики в управлении высока, а уровень психической нагрузки низкий, состояние перенапряжения, когда чрезмерная психическая нагрузка не компенсируется уровнем автоматики, были названы реальными источниками снижения надежности деятельности человека-оператора. Влияние психической нагрузки (или нагрузки при умственной деятельности – *mental workload*) на функциональное состояние человека-оператора стало важной задачей исследований по инженерной психологии, психологии труда и эргономике [Машин В.А., 2007b].

Несмотря на широкий спектр использования, на сегодняшний день не существует общепринятого определения термина "психическая нагрузка". Пытаясь разрешить эту проблему, Международная организация по стандартизации опубликовала в 1991 году стандарт ISO 10075-1:1991 "Ergonomic principles related to mental work-load: General terms and definitions" [1991] ("Эргономические принципы, относящиеся к нагрузке при умственной деятельности: Общие термины и их определения"), в котором в рамках причинно-следственной модели были выделены два основных понятия (см. Приложение 1): "психический стресс" (*mental stress*) и "психическое напряжение" (*mental strain*). В после-

дующей редакции стандарта (ISO 10075-1:2000-11) термин "стресс", имеющий негативный оттенок, был заменен термином "рабочая нагрузка" ("*workload*")<sup>1</sup> [Nachreiner F., Schultetus W., 2003]. Согласно стандарту, понятие "психическая рабочая нагрузка" относится к рабочему окружению и характеризуется комплексом факторов, воздействующим на индивида в процессе деятельности: содержанием выполняемой задачи, техническими средствами для выполнения (оборудование, автоматика), физическими и социальными условиями. Психическая рабочая нагрузка вызывает состояния психического напряжения (напряженности) у индивида, в числе которых выделяют активацию и вработывание (облегчают выполнение задачи), психическое утомление, монотонию (скуку), снижение бдительности и психическое пресыщение (ухудшают выполнение задачи).<sup>2</sup> Ряд авторов дополнительно рассматривают такие состояния в процессе деятельности как "устойчивая работоспособность" и "перенапряжение" [De Waard D., 1996; Meister D., 1976; O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986].

Многие исследователи включают в предложенную стандартом ISO 10075-1 модель также индивидуальные характеристики оператора, которые могут влиять на уровень его психического напряжения: способности [De Waard D., 1996; Eggemeier F.T., 1988; Gopher D., Donchin E., 1986; Kantowitz B.H., 1987; O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Scerbo M.W. et al., 2001], мотивация [Bainbridge L., 1974; Collet C. et al., 2004; De Waard D., 1996; Rouse W.B. et al., 1993; Yeh Y.Y., Wickens C.D., 1988], выбор целей и стратегий выполнения [Bainbridge L., 1974; De Waard D., 1996; Rouse W.B. et al., 1993; Yeh Y.Y., Wickens C.D., 1988], физическое состояние и на-

---

<sup>1</sup> А.Н. Roscoe [1978] впервые предложил вместо термина "стресс", имеющего явно эмоциональную окраску, использовать термин "рабочая нагрузка".

<sup>2</sup> Заметим, что во многих зарубежных работах для описания психической рабочей нагрузки используется понятие "требования задачи" (*task demand*), а термином "mental workload" часто обозначается психическое напряжение индивида в процессе выполнения задачи (также можно встретить с термином "психические усилия" – *mental efforts*, которые должен затратить индивид при достижении намеченной цели).

строение [Collet C. et al., 2004; De Waard D., 1996; Rouse W.B. et al., 1993], подготовка и опыт работы [De Waard D., 1996].

В психическом напряжении оператора выделяют когнитивную составляющую (обусловленную объективным содержанием задачи, например, числом контролируемых параметров) [Kramer A.F., 1991; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003; Roscoe A.H., 1992; Scerbo M.W. et al., 2001] и эмоциональную (отражает вероятность ошибочных действий, значимость последствий ошибок и результата деятельности для индивида)<sup>3</sup> [Danev S. et al., 1975; Miller J.C., Rokicki S.M., 1993; Myrtek M. et al., 1996; Sekiguchi C. et al., 1978; Sheridan T.B., Stassen H.G., 1979; Steele K., Cox T., 1986; Wilson G.F. et al., 1989]. Отечественные исследователи, рассматривая понятие "психической напряженности", также выделяют в ней два вида: операциональную (когнитивную) и эмоциональную (нервно-эмоциональную) [Душков Б.А. и др., 1977; Зинченко В.П., Мунипов В.М., 1979; Наенко Н.И., 1976; Овчинникова О.В., 1968; Петровский А.В., Ярошевский М.Г., 1985; Розенблат В.В., 1970; Свиридов Е.П., 1976].

В отечественных исследованиях в области инженерной психологии, психологии труда и эргономики, вопросы психической нагрузки и психического напряжения рассматриваются в рамках изучения функциональных состояний человека-оператора, которые порождаются его профессиональной деятельностью [Галыгин В.Ф. и др., 1991; Генес В.С., Мадиевский Ю.М., 1974; Душков Б.А. и др., 1977; Егоров А.С., Загрядский В.П., 1973; Ильин Е.П., 1981; Леонова А.Б., 1984; Марищук В.Л., 1974]. Согласно А.С. Егорову и В.П. Загрядскому [1973] результат воздействия внешних факторов на функциональное состояние человека зависит не только от природы и параметров (интенсивности, продолжительности) этих факторов, но также от исходного состояния и индивидуальных особенностей человека (внутренние факторы). В 1981 году А.Б. Леоновой и В.И. Медведевым [1981] было дано подробное описание внешних и внутрен-

---

<sup>3</sup> А.W. Gaillard [1993] предлагал использовать для проявления негативных эмоций и неэффективной энергетической мобилизации организма в процессе психической нагрузки, что приводит к неэффективному поведению и чрезмерной активности, термин "стресс".

них факторов, обуславливающих динамику функциональных состояний человека в процессе трудовой деятельности: факторы среды обитания - "физическое окружение"; факторы социальной среды - "социальное окружение"; факторы индивидуальных особенностей субъекта – "индивидуальные характеристики оператора"; факторы технического оснащения трудового процесса – "рабочее оборудование"; факторы трудового процесса - "задача". Легко заметить, что данные факторы отражают содержание психической рабочей нагрузки, согласно стандарту ISO 10075-1, дополняя его индивидуальными характеристиками оператора. Таким образом, одни и те же факторы определяют и психическое напряжение, и функциональное состояние оператора. Представленные в стандарте ISO 10075-1 основные виды психического напряжения в целом совпадают с видами функциональных состояний операторов, как они определены в отечественной литературе [Леонова А.Б., Медведев В.И., 1981; Ломов Б.Ф., 1982]. Оба понятия (психическое напряжение и функциональное состояние) используются для объяснения одного и того же феномена – способности человека эффективно и надежно выполнить поставленную перед ним задачу. Но если психическое напряжение изначально понималось зарубежными авторами как субъективное переживание психической нагрузки (цена деятельности для оператора), и привлечение физиологических процессов рассматривалось скорее как вынужденная мера (из-за ограниченности субъективных оценок), то истоки исследований функциональных состояний человека отечественными учеными лежат в объективном анализе интегрированного комплекса физиологических, психологических и поведенческих показателей, обуславливающих выполнение им деятельности [Зараковский Г.М. и др., 1974; Леонова А.Б., Медведев В.И., 1981]. С этих позиций функциональное состояние оператора рассматривается в отечественных исследованиях как координированный целью деятельности качественно своеобразный комплексный ответ функциональных систем организма разных уровней (ЦНС, сердечно-сосудистой, дыхательной и др.) на внешние и внутренние воздействия [Ломов Б.Ф., 1982]. А контролю функциональных состояний операторов, управляющих сложными индустриальными процессами

(химическим производством и АЭС), авиационными, морскими и железнодорожными перевозками, придается важнейшее значение, что обусловлено критическим значением действий операторов на уровень безопасности.

В представленной нами работе под термином "психическая нагрузка" понимается совокупность факторов (задача, оборудование, социальное и физическое окружение, индивидуальные особенности субъекта), которые обуславливают динамику различных функциональных состояний оператора в процессе деятельности [Машин В.А., 2007b]. Понятие "функциональное состояние" мы считаем более точным и методически проработанным, чем термин "психическое напряжение", которое мы будем употреблять в своих исследованиях для анализа определенных функциональных состояний человека-оператора. Не случайно, Рабочая Группа по Перспективным Исследованиям НАТО специально использует именно термин "функциональное состояние оператора" при описании результатов новейших экспериментов по оценке и предсказанию ухудшения деятельности человека, выполняющего сложные задачи [Hockey G.R.J. et al., 2003].

Ряд зарубежных авторов для оценки психического напряжения операторов в процессе выполнения профессиональной деятельности предлагают следующую формулу: "психическое напряжение" = "психическая нагрузка" – "способности индивида" [Eggemeier F.T., 1988; Gopher D., Donchin E., 1986; O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986; Kantowitz B.H., 1987; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003; Sanders M.S., McCormick E.J., 1993; Scerbo M.W. et al., 2001; Wickens C.D., 1979]. Другие исследователи добавляют к способностям различные характеристики индивида, которые могут повлиять на психическое напряжение (перечисленные ранее мотивация, цели и стратегии выполнения, физическое состояние и настроение, уровень подготовки и опыт работы) [Bainbridge L., 1974; Collet C. et al., 2004; De Waard D., 1996; Rouse W.B. et al., 1993; Yeh Y.Y., Wickens C.D., 1988]. Такое формализованное представление психического напряжения, возможно, и красиво, но на наш взгляд мало продуктивно. Если мы и можем, допустим, в ходе экспериментального исследования жестко проконтроли-



ровать психическую нагрузку (содержание задачи, физическое и социальное окружение, технические средства), то такие переменные, влияющие на психическое напряжение, как уровень мотивации, субъективный выбор целей и стратегий выполнения (например, ориентация на скорость или безошибочность), остаются во многом независимыми. Таким образом, эта формула не имеет операционального смысла [Машин В.А., 2007b].

Действительно, функциональное состояние оператора (включая и психическое напряжение) определяется уровнем психической нагрузки (характеристиками рабочего окружения, согласно стандарту ISO 10075-1) и характеристиками самого субъекта (индивидуальными особенностями). При этом существует связь функционального состояния оператора с эффективностью и надежностью выполнения им профессиональных задач, что требует создания эффективных и надежных методов и критериев для прямой оценки и непосредственного контроля функционального состояния человека в процессе его деятельности. Именно эта идея лежит в основе разработки адаптивных автоматизированных систем, в которых информация о функциональном состоянии человека оперативно используется для управления уровнем его психической нагрузки. Например, при значимо высоких уровнях психического напряжения часть функций оператора берет на себя автоматика, при значимом снижении активности оператора (включенности его в задачу) автоматика возвращает часть функций управления человеку [Byrne E.A., Parasuraman R., 1996; Kramer A.F., 1991; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Schmidt G., Monfill G.E., 1995; Tattersall A.J., Hockey G.R., 1995]. Принцип автоматического регулирования потока поступающего к человеку информации с учетом его функционального состояния рассматривался и отечественными исследователями в рамках разработки современных пультов управления для операторов [Ильин Е.П., 1974].

Фактически в условиях реальной деятельности не важно, почему оператор, допустим, испытывает психическое перенапряжение в конкретной ситуации: из-за чрезмерной рабочей нагрузки или из-за своих индивидуальных характеристик. Важно, чтобы автоматизированные системы были способны, по-

лучив информацию о перенапряжении оператора, перераспределить часть его рабочих функций между техническим (автоматика) и социальным (персонал) окружением. По существу, рабочее окружение и оператор (его индивидуальные характеристики) образуют единую функциональную систему, согласно П.К. Анохину [1974]. Если ранее рабочее окружение выступало для оператора как внешнее звено саморегуляции [Судаков К.В., 1999], то в адаптивных автоматизированных системах сам субъект выступает для автоматике внешним звеном саморегуляции. В этом случае, критическое изменение функционального состояния оператора должно вести к изменению в рабочем окружении (техническом, физическом, социальном), что в свою очередь должно воздействовать на психическую нагрузку и положительно влиять на функциональное состояние человека (например, снижая или повышая его психическое напряжение) [Машин В.А., 2007b].

Важнейшая задача исследований функциональных состояний - это определение тех пороговых значений, за которыми следует ухудшение деятельности человека [Reid G.B., Colle H.A., 1988; Verwey W.B., Veltman H.A., 1996]. Первоначально модели психического напряжения анализировали негативное воздействие на действия оператора лишь экстремальных психических нагрузок [Meister D., 1976; O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986]. В последующем в них была добавлена область "деактивации" (снижения активности) оператора, что характерно для выполнения монотонной, однообразной деятельности [Brookhuis K.A. et al., 2003; De Waard D., 1996; Rueb J. et al., 1992]. Если в первом случае выход за пределы пороговых значений требует уменьшения психической нагрузки на оператора, то во втором – повышения. В отечественной литературе длительный, многочасовой контроль оператора за состоянием оборудования и технологического процесса (сниженная психическая нагрузка) получил название "оперативного контроля" – скрытая активность в состоянии готовности к оперативным действиям [Ильин Е.П., 1974]. Состояние оперативного контроля является отличительной чертой современного высокотехнологичного производства (см. Приложение 16 – "Профессиограмма деятельности ин-

женера по управлению реактором АЭС"). Оно отражает объективный рост автоматизации управления и надежности эксплуатации таких объектов. При этом всегда сохраняется вероятность выхода из строя оборудования, возникновения непредвиденных отклонений в технологическом процессе, которые требуют от оператора экстренного перехода от контроля к действию [Машин В.А., 1994b].

Для контроля и оценки функционального состояния операторов используются как объективные, так и субъективные показатели. К первым можно отнести измерение различных физиологических показателей: электрокардиограмма (ЭКГ) [Dussault C. et al., 2004; Hankins T.C., Wilson G.F., 1998; Hart S.G., Hauser J.R., 1987; Lee Y.H., Liu B.S., 2003; Scerbo M.W. et al., 2001; Ylonen H. et al., 1997], артериальное давление [Veltman J.A., Gaillard A.W., 1996; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1998], электроэнцефалограмма (ЭЭГ) [Brookings J.B. et al., 1996; Dussault C. et al., 2004; Hankins T.C., Wilson G.F., 1998], вызванные потенциалы [Prinzel L.J. 3rd. et al., 2001; Prinzel L.J. 3rd., 2002; van der Veen F.M. et al., 1996], кожно-гальваническая реакция (КГР) и активность глаз [Scerbo M.W. et al., 2001], дыхание [Scerbo M.W. et al., 2001; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1998], потоотделение [Miyake S., 2001], плетизмограмма пальца [Miyake S., 2001], уровень кортизола в крови [Veltman J.A., Gaillard A.W., 1993]; видеоконтроль поведения [Healey J.A., Picard R.W., 2005; Svensson E. et al., 1997; Tattersall A.J., Hockey G.R., 1995], регистрация частоты коммуникаций [Hart S.G., Hauser J.R., 1987] и результатов деятельности (скорость и темп выполнения, число и характер ошибок) [DeSenti C.T. et al., 2001; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003]. Последние позволяют оценить надежность и эффективность выполнения оператором поставленных задач<sup>4</sup>. К субъективным показателям функционального состояния

---

<sup>4</sup> Необходимо отметить, что изменения в физиологических процессах, вызванные снижением функциональных резервов оператора (утомлением), не приводят немедленно к уменьшению производительности труда (изменению результатов деятельности). Они компенсируются за счет социально-психологических факторов (волевых, мотивационных) [Душков Б.А. и др., 1977; Леонова А.Б., Медведев В.И., 1981; Lenneman J.K. et al., 2005]. Вот почему важно диаг-

относятся различные самоотчеты и опросники шкал психического напряжения, которые заполняются операторами [Bonner M.A., Wilson G.F., 2002; DeSenti C.T. et al., 2001; Eggemeier F.T., Wilson G.F., 1991; Lee Y.H., Liu B.S., 2003; Miyake S., 1997; Miyake S., 2001; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003; Rowe D.W. et al., 1998; Straeter O., Barbarino M., 2004; Svensson E. et al., 1997; Wierwille W.W., Casali J.G., 1983].

Для оценки психической рабочей нагрузки используют данные анализа факторов рабочей среды: содержание задач, характер автоматизированных систем управления, продолжительность непрерывной работы, сменность, длительность сосредоточенного наблюдения во время смены, число важных объектов наблюдения, число аварийных сигналов, уровень ответственности и т.д. [De Waard D., 1996; Dussault C. et al., 2004; Hankins T.C., Wilson G.F., 1998; Hart S.G., Hauser J.R., 1987; Ylonen H. et al., 1997].

На сегодняшний день накоплен значительный материал по психофизиологической оценке функционального состояния оператора при воздействии различных психических нагрузок в лабораторных и в "квазиоперативных" условиях (при выполнении задач на тренажерах), а также в процессе реальной деятельности. Среди методов психофизиологического контроля важное место занимает оценка вариабельность (изменчивости) сердечного ритма<sup>5</sup>. Еще 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 [Парин В.В. и др., 1967]. В своем обзоре исследований, в которых различные физиологические показатели использовались для оценки текущей психической рабочей нагрузки, Р.А. Hancock с коллегами [1985] определил показателями

---

ностировать развитие подобных негативных состояний на ранней стадии, предотвращая вероятность снижения эффективности и надежности действий оператора [Watson D.W., 2001].

<sup>5</sup> По мысли Н.А. Бернштейна [1964], в функциях разброса физиологического показателя естественно видеть отображение интимных (скрытых) механизмов физиологической регуляции.

тели сердечного ритма как наиболее практичные для решения этой задачи. А.Ф. Kramer [1991] в своем обзоре свыше 200 статей рассмотрел чувствительность различных физиологических показателей к изменениям в рабочей нагрузке и выделил среди них сердечно-сосудистые: ЭКГ, АД и объем крови. При этом показатели ЭКГ (вариабельности сердечного ритма - ВСП) демонстрировали, в соответствии с многочисленными исследованиями, наибольшие перспективы. Так, показатели ВСП быстро реагируют на кратковременные изменения уровня психического напряжения, которые отражают динамику психической нагрузки, а длительность непрерывной регистрации ритма сердца может достигать нескольких суток [Aasman J. et al., 1987; Coles M.G.H., Sirevaag E., 1987; Jorna P.G.A.M., 1993; Kramer A.F., 1991; Tattersall A.J., Hockey G.R., 1995; Wilson G.F., Eggemeier F.T., 1991].

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 вариабельности сердечного ритма в качестве возможного психофизиологического инструментария для решения этой задачи. Но прежде чем перейти к обзору основных направлений применения показателей динамики ритма сердца в исследованиях функциональных состояний человека-оператора, кратко остановимся на истории развития исследований вариабельности сердечного ритма, которые касаются лежащих в ее основе физиологических механизмов и методов анализа.

## **1.2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА**

Первые упоминания о вариабельности сердечного ритма в научных трудах относятся к XVIII столетию. В 1733 году английский физиолог S. Hales первым представил научные материалы по исследованию динамики кровообращения у лошади и в своей работе "Statical Essays" [1733] впервые описал ды-

хательную модуляцию частоты пульса и артериального давления [West J.B., 1984]. Швейцарский физиолог А. Галлер в своем восьмитомном труде по общей физиологии человека ("Elementa Physiologiae Corporis Humani") отметил в 1760 году, что ритм здорового сердца не является регулярным, постоянным [Haller A., 1760]. В 1846 году известный немецкий физиолог К. Людвиг [Ludwig C., 1847], исследуя с помощью изобретенного им кимографа деятельность сердечно-сосудистой системы собак и регистрируя одновременно сердечный ритм, дыхание и артериальное давление, обнаружил, что сердечный ритм возрастает при вдохе и снижается при выдохе. Эти дыхательные колебания сердечного ритма исчезали после перерезки блуждающих нервов. Он также впервые зафиксировал изменения артериального давления, сопряженные с дыхательными движениями, назвав их "волнами кровяного давления". Зависимость сердечного ритма от частоты дыхания получила в последующем название дыхательной синусовой аритмии (ДСА). Связь дыхательных колебаний сердечного ритма с возрастом были исследованы немецким физиологом Э. Герингом [Hering E., 1871]. После открытия "волн кровяного давления" внимание исследователей было приковано к исследованию этого феномена. В 1865 году немецкий терапевт L. Traube [1865], исключив влияние дыхания в экспериментах на животных, обнаружил существование других самостоятельных ритмических изменений артериального давления с периодом около 10 секунд. Эти колебания были названы Э. Герингом "волнами Траубе" [Hering E., 1869]. Он также доказал прямую связь дыхательного ритма с колебаниями артериального давления. Поэтому колебания артериального давления, синхронные с ритмом дыхания, были названы "волнами Геринга". В 1876 году, экспериментируя над животными, немецкий физиолог S. Mayer [1876] зарегистрировал колебания артериального давления с большим периодом, чем дыхательные. Они получили название "волн Майера". В последующем работами других авторов было установлено, что все эти волны наблюдаются и при исследовании динамики сердечного ритма.

Изначально одним из центральных направлений в исследовании динамики сердечного ритма было изучение физиологических механизмов, опосредующих колебания сердечных сокращений. В 1840 году известными немецкими физиологами братьями Е.Н. Weber и Е.Ф. Weber было открыто угнетающее (тормозящее) действие блуждающих нервов на деятельность сердца [Hoff H.E., 1940]. О своих исследованиях они впервые сообщили в 1845 году на научном конгрессе в Неаполе (Италия) и опубликовали полученные результаты на следующий год [Weber E., 1846]. В 1707 году итальянский анатом и хирург А.М. Valsalva впервые описал изменения сердечного ритма при пробе с задержкой дыхания на высоте вдоха ("маневр Вальсальвы"). В 1860 году русский анатом и физиолог П.П. Эйnbrодт в своей работе о влиянии дыхания на удары сердца и кровяное давление [Einbrodt P.P., 1860] показал, что "маневр Вальсальвы" демонстрирует влияние вагуса на сердце, которое возрастает во время выдоха после задержки дыхания и затем снижается. Экспериментальные исследования П.П. Эйnbrота касались изучения влияния блуждающего нерва на сердце. Его опыты продемонстрировали, что при раздражении блуждающего нерва у птиц и у животных происходит замедление работы сердца, а при его длительном раздражении возникает полная остановка. Им было также установлено, что ни при какой силе раздражения блуждающих нервов не происходило учащения сердечных сокращений, как это утверждал немецкий физиолог и философ Я. Молешотт. Важно также наблюдение П.П. Эйnbrодта, что после двусторонней перерезки блуждающих нервов у птиц, так же как и у млекопитающих, происходит учащение сердцебиения.

Исследования П.П. Эйnbrодта продолжил его ученик А.И. Бабухин, который в 1862 году в своей докторской диссертации "Об отношении блуждающих нервов к сердцу" обобщил накопленные на тот момент наукой факты [Макаров В.А., 2003]. Результаты, полученные А.И. Бабухиным, показали, что при раздражении блуждающих нервов силой тока, равной пороговой или несколько выше, происходит неизменно торможение сердечной деятельности. При силь-

ном же электрическом раздражении блуждающих нервов происходит полная остановка сердца.

Известный русский физиолог И.Ф. Цион в 1866 г. в лаборатории К. Людвига открыл положительный хронотропный эффект влияния симпатического нерва на сердце и обнаружил центростремительный (афферентный) нерв, начинающийся от дуги аорты, который рефлекторно понижал артериальное давление, если аорта растягивалась вследствие повышения артериального давления в ней [Квасов Д.Г., 1962]. Основоположник казанской школы физиологов Ф.В. Овсянников в 1871 году обнаружил сосудодвигательный центр в продолговатом мозге и установил, что симпатический и парасимпатический нервы оказывают противоположное влияние на сердце и другие органы [Овсянников Ф.В., 1955].

В 1897 году американский невролог R.J. Hunt [1897] исследовал влияние ингибирующих и ускоряющих нервов на сердечный ритм. Английский физиолог F.A. Bainbridge в 1915 году проанализировал роль венозного наполнения [Bainbridge F.A., 1915] и дыхания на частоту пульса [Bainbridge F.A., 1920]. F.A. Bainbridge попытался объяснить динамику сердечного ритма при дыхании влиянием на барорецепторы и рецепторы объема легких изменений внутригрудного давления при вдохе и выдохе.

В 1934 году в статьях австралийского нейрофизиолога J.C. Eccles и его американского коллеги G.L. Brown [Brown G.L., Eccles J.C., 1934a, 1934b] была подчеркнута важная роль вагуса (блуждающего нерва) в регуляции ритма сердца. Они исследовали роль медиатора ацетилхолина при ингибирующем влиянии вагуса на сердце и пришли к выводу, что только электрические процессы могут объяснить столь быструю передачу нервного сигнала на центральные синапсы. В том же году в работе американских физиологов A. Rosenblueth и A.F. Simeone [1934] была описана взаимосвязь эффектов вагуса и ускоряющих нервов на сердечный ритм. Они установили, что влияние симпатической нервной системы (СНС) на сердечный ритм проявляется в медленных колебаниях, а дыхательные, быстрые колебания сердечного ритма, опосредованы исключительно



но парасимпатической нервной системой (ПНС). Последующие исследования подтвердили, что дыхательная синусовая аритмия может служить показателем регулирования сердечного ритма парасимпатической нервной системой [Katona P.G., Jih F., 1975].

В работах группы английских ученых [Anrep G.V., et al., 1936a; Anrep G.V., et al., 1936b] специально была рассмотрена история изучения физиологических механизмов дыхательной синусовой аритмии. Они впервые экспериментально обосновали двойную природу дыхательных волн сердечного ритма: рефлекторную (растяжение легких через афферентную обратную связь влияет на возбуждение регулирующих работу сердца центров головного мозга), сформулированную в 1871 году Э. Герингом [Hering E., 1871], и центрогенную (фазическое влияние медуллярных центров дыхания на возбуждение ядер ствола головного мозга, контролирующего сердечный ритм), которая была предложена в 1865 году L. Traube [1865]. Эти идеи нашли отражение и в развивающейся экспериментальной психологии. В 1874 году немецкий психолог и физиолог В. Вундт в своем epochальном труде "Основания физиологической психологии" [1880] в качестве физиологического метода исследования простейших элементов сознания отмечает контроль сердечного ритма и останавливается на описании рефлекторной природы сердечных колебаний, вызванных дыханием. Функциональное отношение между амплитудой ДСА и тонусом блуждающего нерва было предложено Э. Герингом [Hering H.E., 1910], который утверждал, что увеличение частоты сердечных сокращений во время вдоха и ее уменьшением во время выдоха указывает на функцию вагуса<sup>6</sup>.

В XX веке в исследованиях variability сердечного ритма произошел переход от качественного описания колебаний кардиоинтервалов к количественному анализу. В 1932 году A. Fleisen и R. Beckman [1932] впервые описали различные типы волн в последовательности R-R интервалов ЭКГ. Также впер-

---

<sup>6</sup> Современные представления о физиологических процессах, лежащих в основе различных компонентов ВСР, представлены нами во второй главе.

вые они применили стандартное отклонение межпульсовых интервалов для оценки общей изменчивости колебаний сердечного ритма. Используя графическое представление средней длительности межпульсовых интервалов за каждый дыхательный цикл, они обнаружили медленные колебания сердечного ритма длительностью  $60 \div 80$  сек и  $10 \div 25$  сек (которые позднее были названы очень медленными и медленными колебаниями). В 1927 голландский инженер В. van der Pol сконструировал электронную схему, соответствующую математической модели сердечных сокращений [van der Pol B., van der Mark J., 1928]. Он обнаружил, что при определенных условиях возникающие в схеме колебания были не периодическими, как при нормальном сердцебиении, а нерегулярными (стохастическими). Исследуя механизмы дыхательной синусовой аритмии, М. Clynes [1960] на основе теории автоматического регулирования рассчитал передаточную функцию "дыхание - вагусное торможение" и построил компьютерную модель синусового узла, которая высоко коррелировала с частотой сердечных сокращений реального сердца. В 1962 году Н.Р. Warner и А. Сох попытались построить математическую модель управления сердечным ритмом эфферентной информацией симпатических и вагусных нервов [Warner H.R., Cox A., 1962].

Ранние методы анализа variability сердечного ритма как правило строились на использовании кратковременных ритмограмм и включали в себя простые числовые оценки дескриптивной статистики (показатели временной области ВСР): меры среднего уровня, меры рассеяния [Lacey J.I., Lacey V.C., 1958; Porges S.W., Raskin D.C., 1969]. Начиная с 1970-х годов стали активно развиваться методы спектрального анализа (показатели частотной области ВСР) для исследования биологических систем [Attinger E.O. et al., 1966]. Первые спектры колебаний сердечного ритма были представлены отечественными учеными в работах Р.М. Баевского и его коллег [1968a], и в экспериментах, выполненных под руководством чешского исследователя J. Penaz [1968]. Были подтверждены результаты исследований А. Fleisen и R. Beckman. Например, J. Penaz и его сотрудники используя спектральный анализ обнаружили в колеба-

ниях сердечного ритма очень медленные (с частотой  $0.017 \div 0.05$  Гц или периодом  $60 \div 20$  сек), медленные (с центральной частотой около  $0.1$  Гц или периодом  $10$  сек) и выраженные высокочастотные волны, обусловленные дыхательной частотой. В западных исследованиях спектральный анализ для оценки ВСР был введен работами [Chess G.F. et al., 1975; Sayers V.McA., 1973; Womack V.F. 1971], а в эксперименте [Porges S.W. et al., 1980] был впервые использован кросс-спектральный анализ как метод оценки взаимосвязи между вариабельностью дыхания и сердечного ритма у человека. В следующих работах [Berger R.D. et al., 1989; Saul J.P. et al., 1991] был представлен анализ передаточной функции для количественной оценки влияний дыхания на ВСР. Методы анализа ВСР постоянно совершенствуются. В последние годы динамично формируется направление, связанное с использованием показателей ВСР в искусственных нейронных сетях для диагностики различных уровней психической нагрузки [Wilson G.F., Russell C.A., 2003]. В работе [Wilhelm F.H. et al., 2005] комплексная амплитудная и частотная демодуляция предложена как метод для анализа высоко- и низкочастотной вариабельности сердечного ритма в нестационарных условиях. Авторы полагают, что в отличие от спектрального анализа, данный метод позволяет пролить свет на кратковременные изменения в вегетативной регуляции, например, в условиях острого физического или психического стресса<sup>7</sup>.

Со второй половины XX столетия активно развивается теория динамических систем и методы анализа нелинейной динамики, которые постепенно стали использоваться в исследованиях ВСР. Американскими учеными A.L. Goldberger и B.J. West была впервые сформулирована гипотеза, что последовательность R-R интервалов здорового человека является хаотичной [Goldberger A.L. et al., 1986; Goldberger A.L., West B.J., 1987]. Исследования в области нелинейных колебаний позволили сделать вывод, что нелинейные феномены, несо-

---

<sup>7</sup> Более подробно на временных и спектральных показателях ВСР мы остановимся во второй главе.

мненно, являются одной из причин ВСП и могут содержать важную информацию для ее физиологической интерпретации [Флейшман А.Н., 2001; Babloyantz A., Destexhe A., 1988; Braun C. et al., 1998; Goldberger A.L. et al., 1990; Kitney R. et al., 1982; Peng C.-K. et al., 1994]. За этим последовало развитие различных методов нелинейной динамики для анализа ВСП, таких как оценка  $1/f$ -наклона масштабированного спектра Фурье – спектральная экспонента [Kobayashi M, Musha T., 1982], детрендный анализ флуктуаций – фрактальная корреляция [Peng C.-K. et al., 1995], график Пуанкаре-Лоренца [Denton T.A. et al., 1990; Kamen P.W., Tonkin A.M., 1995; Kamen P.W. et al., 1996], экспонента Ляпунова [Rosenstien M. et al., 1993; Wolf A. et al., 1985], экспонента Херста [Mandelbrot B.B., Van Ness J.W., 1968; Yamamoto Y. et al., 1995b], корреляционная размерность [Mayer-Kress G. et al., 1988], фрактальная размерность [Glenny R.W. et al., 1991], энтропия Колмогорова-Синяя [Pincus S.M. et al., 1991], приближенная энтропия  $ApEn$  [Pincus S.M., 1991], информационная энтропия [Cugini P. et al., 1999], кластерный спектральный анализ [Yamamoto Y., Hughson R.L., 1991, 1993a], критерий перенормированной энтропии [Анищенко В.С. и др. 1994; Kurths J. et al., 1995], метод масштабного индекса [Schmidt G., Monfill G.E., 1995], тонально-энтропийный анализ [Oida E. et al., 1997], критерий бинарной энтропии [Cysarz D. et al., 2000], анализ информационных областей [Porta A. et al., 2000] и др.

По мере развития микроэлектроники и вычислительной техники возрастали возможности исследователей использовать математические методы анализа ВСП как для понимания физиологических основ регуляции сердечного ритма, так и для использования показателей ВСП в психофизиологических целях. В конце 50-х годов XX столетия перед отечественными учеными была поставлена задача медицинского контроля состояния здоровья человека во время космических полетов. Именно в рамках космической медицины была сформулирована концепция о системе кровообращения как индикаторе адаптационной деятельности организма, активно развивались подходы, связанные с анализом механизмов регуляции сердечного ритма, позволяющем получить прогностическую

информацию о функциональном состоянии всего организма [Парин В.В. и др., 1967; Парин В.В. и др., 1969]. Исследователей интересовало, в первую очередь, влияние на функциональное состояние человека различных стрессовых факторов [Акулиничев И.Т., Баевский Р.М., 1964; Воскресенский А.Д., Вентцель М.Д., 1965].

Анализ ВСР получил развитие в отечественной космической медицине уже во время первых полетов человека [Парин В.В. и др., 1965]. Многолетний опыт его применения для оценки функционального состояния космонавтов на разных этапах полета показал, что он позволяет определять уровень стресса, распознавать появление перенапряжений и состояний функционального напряжения, предшествующих развитию болезни [Баевский Р.М., Никулина Г.А., 2000]. В 1966 году в Москве состоялся 1-й Всесоюзный симпозиум по ВСР [Парин В.В., Баевский Р.М., 1968], на котором было представлено 80 докладов<sup>8</sup>. В докладе Г.А. Никулиной [1968] были приведены результаты применения современных компьютерных технологий для анализа variability сердечного ритма, которые позволили выделить медленные волны с периодами от 36÷150 секунд до 17÷50 минут. В докладе Р.М. Баевского с соавторами [1968а] были проанализированы перспективы использования статистического, автокорреляционного и спектрального анализа сердечного ритма для проведения оперативной динамической оценки степени напряжения регуляторных механизмов в условиях адаптации к стрессу. На этом симпозиуме Р.М. Баевский предложил двухконтурную модель регуляции сердечного ритма [Баевский Р.М., 1968]. Она основывалась на кибернетическом подходе, при котором система управления синусовым узлом представлялась в виде двух взаимосвязанных контуров:

---

<sup>8</sup> Для сравнения, лишь в 1977 году в Лондоне прошла конференция Biological Engineering Society, в которой приняли участие ряд физиологов и специалистов по системам управления, доклады которых были посвящены проблемам ВСР [Kitney R.I., Rompelman O., 1980]. На ней рассматривались 3 основных вопроса: физиологические механизмы, включенные в управление сердечного ритма, анализ ВСР через использование теории управления системами, и ряд практических приложений исследований ВСР.

управляющего центрального (подкорковые и высшие вегетативные центры, корковые механизмы регуляции) и управляемого автономного (синусовый узел, блуждающие нервы и их ядра в продолговатом мозге), с каналами прямой и обратной связи [Баевский Р.М., Берсенева А.П., 1997]. Согласно этой модели автономный контур "работает" без вмешательства центрального до тех пор, пока отсутствует необходимость активного участия управляемой им системы в программах деятельности более высоких уровней управления. В этом случае выраженность дыхательных колебаний сердечного ритма, характерных для авторегуляции, уменьшается и увеличивается амплитуда более медленных колебаний, отражающих активацию более высоких уровней управления. Идеи Р.М. Баевского были в последующем развиты в работах А.Н. Флейшмана, который описал модель 4-х уровней нервной регуляции сердечного ритма [1999а], включающую в себя: сегментарный (автономный), стволовой, гипоталамический и полушарный уровни регуляции.

Развитие спектральных методов анализа кардиоинтервалов [Нидеккер И.Г., 1968] позволил отечественным исследователям выделить в сердечном ритме волны с периодами  $15 \div 30$  с,  $40 \div 70$  с,  $2 \div 5$  мин и еще более медленные волны [Баевский Р.М., 1976; Воскресенский А.Д., Вентцель М.Д., 1974]. В 70-е годы Р.М. Баевский сформулировал гипотезу о связи колебательных процессов в организме с деятельностью различных уровней системы управления физиологическими функциями [Баевский Р.М., 1976; Баевский Р.М., Чернышев М.К., 1976]. Согласно этой гипотезе, чем длиннее период колебаний, тем с более высоким уровнем управления они связаны. Чем больше элементов — объектов управления входит в контур регулирования, тем дольше длятся процессы сбора информации, афферентного синтеза и передачи управляющих сигналов. Следовательно, чем длиннее период биоритма, тем с большим числом объектов управления связан соответствующий уровень (контур) управления. В этот же период наметился значительный рост отечественных исследований variability сердечного ритма. На 2-м Всесоюзном симпозиуме, посвященном кибернетическим методам анализа сердечного ритма, который состоялся в 1977

году, было представлено уже свыше 300 докладов [Баевский Р.М. и др., 1999]. В 1984 году в нашей стране была опубликована первая монография по анализу ВСП [Баевский Р.М. и др., 1984]. В 1996 году в Ижевске состоялся Международный симпозиум по теоретическим и прикладным аспектам анализа ВСП [Баевский Р.М., Шлык Н.И., 1996], на котором было представлено 150 докладов. В 1997 году в Новокузнецке состоялся первый симпозиум, посвященный медленным колебаниям сердечного ритма [Флейшман А.Н., 1997], который с 1999 года получил статус международного. В 1999 году в Москве прошел Международный симпозиум "Компьютерная электрокардиография на рубеже столетий" [Баевский Р.М., 1999], наибольшее число докладов (более 50) было представлено на секцию "Вариабельность сердечного ритма". Наконец, в 2001 году отечественными учеными были подготовлены методические рекомендации по анализу ВСП при использовании различных электрокардиографических систем [Баевский Р.М. и др., 2001].

Значительное влияние на широкий рост исследований по ВСП в Западной Европе и США в 80-е годы оказала статья S. Akselrod с соавторами [1981], посвященная использованию спектрального анализа колебаний сердечного ритма для понимания физиологических механизмов, лежащих в их основе. В этом исследовании применялись фармакологические пробы, и было показано, что симпатическая блокада уменьшает амплитуду низкочастотного пика, парасимпатическая блокада устраняет средние и высокочастотные пики, их комбинация устраняет все флуктуации сердечного ритма. Возможность оценки активности различных отделов вегетативной нервной системы (ВНС) с помощью спектрального анализа сердечного ритма породил значительный интерес исследователей [Pagani M. et al., 1986; Pomeranz V. et al., 1985]. В ряде экспериментов было установлено, что области высокочастотного пика на спектре не только связана с дыханием, но и могут служить количественной мерой парасимпатической регуляции сердца [Selman A. et al., 1982].

Бурный рост исследований по ВСП в различных областях и в различных странах определил создание международной рабочей группы, которая в 1996

году подготовила рекомендации по стандарту измерений, физиологической интерпретации и клиническому использованию ВСР [Malik M. et al., 1996]. Именно этот документ рекомендовал использовать термин "вариабельность сердечного ритма" (Heart Rate Variability - HRV) для описания изменчивости в последовательности R-R интервалов.

Стремительное развитие методов анализа ВСР, разработка физиологических основ различных компонентов динамики сердечного ритма предопределили широкое использование показателей ВСР в исследованиях функциональных состояний человека. Ниже мы попытаемся осветить основные экспериментальные результаты в этой области.

### **1.3. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА**

В отличие от физиологии, которая интересуется, в первую очередь, физиологическими механизмами, опосредующими колебания сердечного ритма, или клинических исследований, которые проявляют интерес к связям ВСР с различными формами нарушений и расстройств, психофизиологические исследования в профессиональных приложениях с самого начала направлялись психологической парадигмой, в которой физиологические параметры рассматриваются с точки зрения отношения к психическим процессам и поведению человека. Уже в ранних психофизиологических исследованиях сердечный ритм представлялся как переменная, которая находится в причинной зависимости от когнитивных процессов [Lacey J.I., 1967]. Любопытно, что в этот период ВСР оценивалась рядом исследователей как ошибка измерения, которая приписывалась недостаткам контроля над экспериментальными условиями [Berntson G.G. et al., 1997]. Последующие исследования доказали, что здоровая сердечная функция характеризуется сложной вариабельностью, которая отражает гибкость и чувствительность регуляторных систем организма, обеспечивающих устойчивость к психическим и эмоциональным нагрузкам. Таким образом, ста-



бильность (устойчивость) внутренней среды организма поддерживается через вариабельность в динамических отношениях его функциональных системам [West B.J., 1990]. Эта способность к динамическому взаимодействию системных элементов организма, в отличие от сохранения единственно стабильного состояния, согласно классической модели гомеостаза У.Б. Кэннона [Cannon W.B., 1932], позволяет организму функционировать эффективно перед лицом постоянно изменяющегося внешнего окружения [Thayer J.F., Friedman W.H., 1997]. Остановимся же подробнее на различных психофизиологических исследованиях функциональных состояний человека методами анализа вариабельности сердечного ритма, отдельно рассмотрев воздействие психических нагрузок на состояние человека в лабораторных, тренажерных и реальных условиях.

Первые исследования воздействия психической нагрузки на функциональные состояния человека с помощью показателей сердечно-сосудистой системы упоминаются в работе голландского ученого С. Winkler [1899], который продемонстрировал, что выполнение арифметического теста ведет к повышению частоты пульса, росту артериального давления и снижению дыхательной синусовой аритмии. Рост частоты сердечных сокращений (ЧСС) в ответ на эмоциональные нагрузки был отмечен в 1949 году в экспериментах R.V. Malmo и С. Shagass [1949]. Голландский исследователь J.W.H. Kalsbeek был одним из первых, кто попытался использовать ВСР как индикатор психической нагрузки. В его исследованиях [Kalsbeek J.W.H., Ettema J.H., 1963] было обнаружено постепенное снижение вариабельности R-R интервалов по мере роста сложности выполнения психических задач. Авторы предложили использовать показатель временной области ВСР (стандартное отклонение R-R интервалов - SDNN) как меру психической нагрузки, рассматривая снижение в ВСР как эффект возросших требований задачи. В следующей работе, выполненной под руководством J.W.H. Kalsbeek, был представлен анализ эффекта мотивации (денежное вознаграждение) на ВСР в процессе выполнения психической задачи [Kalsbeek J.W.H., Sykes R.N., 1967]. Авторы установили, что "мотивированная" группа имела постоянно сниженный уровень ВСР (SDNN) в процессе выполнения за-

дачи. При этом уровень снижения ВСР в "немотивированной" группе был в начале выполнения незначительным и лишь по мере выполнения увеличивался.

Постепенно вариабельность сердечного ритма становится для исследователей одним из важнейших объективных показателей психической нагрузки. К.S. Bowers и К.R. Keeling [1971] проанализировали изменения ВСР при выполнении заданий на мышление, а S.G. Danev и С.R. de Winter [1971] - при провоцировании ошибочных реакций. Динамика ВСР исследовалась при выполнении задач на время реакции [Mulder G., van der Mulder-Hajonides, 1972; Porges S.W., 1972], при воздействии слуховых раздражителей [Vranekovic G. et al., 1974]. В экспериментах проводилась оценка ВСР при различных уровнях психической нагрузки. Например, в работе S.W. Porges и D.C. Raskin [1969] была показана связь возрастающих требований внимания на снижение ВСР. В исследовании, выполненном P.S. Blitz совместно с коллегами [1970], различные уровни психической нагрузки задавались количеством бинарных выборов в минуту. Было установлено, что оценки синусовой аритмии значительно различались между отдельными уровнями психической нагрузки, при этом показатель частоты сердечных сокращений был наиболее чувствительным индикатором. Различные экспериментальные исследования продемонстрировали, что ослабление синусовой аритмии (временные и частотные показатели ВСР) может рассматриваться как индикатор возрастания психической нагрузки и внимания [Boutcher S.H. et al., 1998; Ettema J.H., Zielhuis R.L., 1971; Hyde C., Izard C.E., 1997; Hyndman B.W., Gregory J.R., 1975; Inomata O., 1977; Luczak H., Laurig W., 1973; Markhasuna I., Oranskii I., 1971; Meshkati N., 1988; Mulder G., 1979; Rohmert W. et al., 1973; Sayers B.McA., 1971].

В 1973 году выходит целый номер журнала *Ergonomics*, посвященный приложению анализа ВСР к измерениям психической нагрузки [Luczak H., Laurig W., 1973; Rohmert W. et al., 1973; Sayers B.McA., 1973]. В статье E.N. Corlett [1973] были рассмотрены методические вопросы использования ВСР в полевых условиях. P.A. Firth [1973] в своей статье остановился на влиянии психологических факторов на отношение между сердечной аритмией и психиче-

ской нагрузкой. Согласно результатам эксперимента, выполненного G. Mulder и W.R.E.H. Mulder-Hajonides van der Meulen [1973], среднечастотный диапазон ВСР (MF, 0.07÷0.14 Гц) продемонстрировал наибольшую чувствительность к психической рабочей нагрузке в сравнении с общей дисперсией или дыхательными колебаниями сердечного ритма. Авторы заключили, что подавление MF компонента ВСР отражает усилия, которые требуются от субъекта для выполнения психической задачи, а восстановление спектральной мощности во время периода расслабления после завершения психической задачи отражает степень предшествующих усилий. Полученные выводы подтвердили данные, опубликованной в 1971 году статьи В.МсА. Sayers [1971], в которой были описаны устойчивые изменения в спектре сердечного ритма в процессе психической нагрузки, особенно в диапазоне 0.05÷0.15 Гц. Чувствительность показателя MF к психической нагрузке была в последующем установлена во многих исследованиях [De Waard D. et al., 1995; De Waard D., 1996; De Waard D., Brookhuis K.A., 1997; Mulder L.J.M., Mulder G., 1987; Noguchi Y., 1997; Robbe H.W. et al., 1987; Vicente K.J. et al., 1987]. В недавней работе G. Mulder и его коллег [2000] делается вывод, что снижение мощности в MF диапазоне очень диагностично механизмам когнитивного контроля, требующим внимания от оператора.

Было проведено значительное число лабораторных исследований, которые продемонстрировали связь между психической рабочей нагрузкой и ослаблением или полным подавлением ДСА [Allen M.T., Crowell M.D., 1989; Boyce P.R., 1974; Hitchen M. et al., 1980; Kamphuis A., Frowein H.W., 1985; Langewitz W., Ruddle H., 1989; Lee D.H., Park K.S., 1990; Mulder G., Mulder L.J.M., 1981], при этом повышенная ДСА была связана с условиями психологической релаксации [Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Sakakibara M. et al., 1994]. J.W.H. Kalsbeek [1973] предположил, что полное подавление ДСА обусловлено выполнением человеком деятельности на пике своих возможностей, когда у него отсутствуют дополнительные резервы.

В ряде исследований была установлена связь психических усилий и требований задачи с одновременным понижением спектральной мощности сердеч-

ного ритма в частотном диапазоне около 0.1 Гц (так называемый "0.1 Гц компонент" или MF диапазон) и в высокочастотном диапазоне HF (ДСА) [Aasman J., et al., 1987; Backs R.W., Seljos K.A., 1994; Hyndman B.W., Gregory J.R., 1975; Itoh Y. et al., 1990; Jorna P.G.A.M., 1993; Mulder G., Mulder L.J.M., 1980; Mulder G., Mulder L.J.M., 1981; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1993; Vicente K.J. et al., 1987]. В эксперименте [Houtveen J.H. et al., 2002] в процессе моделирования психической нагрузки (ответы на интеллектуальные вопросы при параллельном выполнении задачи на время реакции) было установлено значимое снижение мощности спектра сердечного ритма как в высокочастотном (0.125÷0.5 Гц), так и в низкочастотном (LF) диапазонах (0.0625÷0.125 Гц).

Современные исследователи продолжают активно изучать в лабораторных условиях влияние различных видов психической нагрузки на ВСР [Grillot M. et al., 1995; Weisz J. et al., 1992]. Например, в работе А. Steptoe и С. Vogele [1991] оценивались задачи на проблемное решение, задачи на обработку информации, психомоторные задачи (когнитивная нагрузка), аффективные условия и условия, вызывающие отвращение или боль (эмоциональная нагрузка). В исследовании [Coles M.G.H., Sirevaag E., 1987] была установлена связь показателей ВСР с выбранной субъектом стратегией для решения задачи. В эксперименте [Tripathi K.K. et al., 2003] исследовалась связь показателей ВСР с различными типами психической нагрузки (задание на различение двух звуковых тонов; задание на оперативную память: распознавание 4 геометрических фигур из набора 90 фигур различной формы и размера; задание на выполнение однообразной деятельности, требующей длительной концентрации внимания: распознавание одной геометрической фигуры из набора 90 фигур). Сложность выполнения заданий варьировалась через время задержки между стимулами.

Исследователи специально проанализировали воздействие психической нагрузки, связанной с рабочей памятью, на показатели ВСР [Backs R.W., Seljos K.A., 1994; Jorna P.G.A.M., 1992; Tripathi K.K. et al., 2003]. Ими были получены данные о чувствительности показателя LF к переходу от состояния покоя к выполнению задач с нагрузкой на рабочую память (между уровнями нагрузки раз-

личий не было). При этом показатель HF не обладал подобной чувствительностью. В эксперименте M. Redondo и F. Del Valle-Inclan [1992] были получены данные в пользу чувствительности спектральной мощности сердечного ритма в частотном диапазоне около 0.1 Гц к различным уровням нагрузки на память, более отчетливо снижаясь при высокой нагрузке. В докладе [Brinkman W.P. et al., 2004] были представлены результаты моделирования различной нагрузки на оперативную память через решение на калькуляторе уравнений двух уровней сложности: легких и трудных. Было установлено, что мощность спектра в частотном диапазоне около 0.1 Гц значимо снижалась при переходе от решения легких уравнений к сложным (заметим, что субъективные оценки сложности значимо возрастали). В исследовании памяти, выполненным A. Vincent и его коллегами [1996], была использована модель "уровня обработки", предложенная Крэйком и Локхартом в 1972 году. Согласно этой модели, память - побочный продукт когнитивной обработки информации и сохранение ее следов прямо зависит от глубины обработки. Анализ ВСП был выполнен при различных уровнях когнитивной обработки информации. Авторы установили, что возрастание глубины уровня кодирования представленной информации сопровождается возрастанием ЧСС и снижением ВСП. Они предположили, что показатели ВСП могут стать основой для объективных индексов глубины когнитивной обработки информации при ее запоминании и хранении. По результатам своих исследований, К.К. Tripathi и его коллеги [2003] сделали вывод, что показатели LF и MF чувствительны к нагрузке на оперативную память.

Ряд экспериментальных исследований подтвердили снижение мощности MF компонента ВСП в задачах, требующих высокого уровня внимания [Aasman J. et al., 1988; Althaus M. et al., 1999; Althaus M. et al., 1998; Jorna P.G.A.M., 1992; Mulder L.J.M., 1992; Redondo M., Del Valle-Inclan F., 1992]. Это позволило исследователям предположить, что данный показатель является чувствительным индексом количества психических усилий, инвестированных для выполнения задач, требующих внимания. В работе [Negoescu R.M. et al., 1993] задачи на концентрацию внимания вызвали значимое снижение мощности спектра как в

HF, так и LF диапазонах. В работе R.W. Backs [1997] исследовались психофизиологические аспекты концентрации и распределения внимания. Им было установлено, что сердечный ритм и показатели ВСР продемонстрировали чувствительность только при выполнении задач с распределением внимания.

Кроме исследований психических процессов памяти, внимания и мышления, показатели ВСР активно используются при изучении личностных особенностей субъекта деятельности, которые оказывают существенное влияние на уровень психического напряжения при воздействии психических нагрузок. Так, в исследованиях Т.М. Dembroski и его коллег [1977, 1978] сравнивалась динамика сердечного ритма в группах лиц с поведением по типу "А" и "Б" (М. Friedman, R.H. Rosenman [1974]) в покое и при выполнении заданий на время реакции. Для группы с поведением по типу "А" была характерна более высокая активность симпатической нервной системы при выполнении заданий и более высокая вариабельность сердечного ритма в исходном состоянии. Данный вывод был подтвержден результатами других экспериментов [Lawler K.A., Schmied L.A., 1988; Lawler K.A. et al., 1989; Sato N. et al., 1998], в которых в качестве психической нагрузки выступали задания на время реакции, тест Струпа и сдача экзаменов. L.A. Schmied и K.A. Lawler [1989] в своем исследовании моделировали приобретенную беспомощность (поведенческая реакция на неприятные раздражители, основанная на убежденности в беспомощности личности перед окружающим миром) у конторских служащих (женщины) и установили, что лица с поведением по типу "А" имели в этом состоянии выраженное снижение ВСР при выполнении задач-анаграмм, в отличие от лиц с поведением по типу "Б". Лица с поведением по типу "А", у которых диагностировался экстернальный локус контроля (когда человек полагает, что происходящие с ним события являются результатом внешних сил, случая, обстоятельств, других людей) имели значимо более высокую реактивность показателей ЧСС и ВСР. Авторы предположили, что недостаток контроля ситуацией или экстернальный локус контроля имеют у женщин с поведением по типу "А" связь с сердечно-сосудистой реактивностью. В эксперименте [Oishi K. et al., 1999]

была проанализирована связь между выраженностью поведения по типу "А" с динамикой физиологических показателей во время следующих психических нагрузок: (1) равномерное выполнение арифметического аудиотеста, (2) выполнение бланкового арифметического теста с установкой работать как можно быстрее и точнее, (3) прослушивание спокойной, расслабляющей музыки (Ф. Шопен), (4) прослушивание "белого" шума. Выраженность поведения по типу "А" оценивалась специальным опросником КГ по трем факторам: "агрессивность-враждебность", "требовательность-безотлагательность" и "быстродействие". В процессе выполнения арифметических тестов значения ЧСС и индекса LF/HF значимо возрастали, а показателя HF снижались. Авторы отметили, что наиболее выраженная динамика физиологических показателей наблюдалась при выполнении задачи, требующей высокой скорости и точности выполнения. В процессе слушания музыки и шума не было установлено значимых изменений. Значимые положительные коэффициенты корреляции между выраженностью поведения по типу "А" (фактор "быстродействия" при этом играл центральную роль) и относительным ростом к исходному состоянию индекса LF/HF были обнаружены при выполнении арифметических тестов. При прослушивании расслабляющей музыки значимые положительные коэффициенты корреляции были установлены между фактором "требовательность-безотлагательность" и относительным ростом индекса LF/HF. При воздействии шума схожие результаты были получены для индекса LF/HF, а также для LF и ЧСС. Авторы не обнаружили связи выраженности поведения по типу "А" с показателем HF. В целом, по результатам своих экспериментов авторы подтвердили ранее полученные выводы: симпатическая сердечная активность в условиях психического стресса становится выше для лиц с поведением по типу "А", чем для лиц с поведением по типу "Б". Исследования японских ученых [Kamada T. et al., 1992a, 1992b] позволили сделать вывод, что показатели ВСР имеют достаточную чувствительность, чтобы дискриминировать указанные различия в вегетативном балансе между лицами с поведением по типу "А" и "Б" не только в обычных или конкурирующих (соревнователь-

ных) условиях выполнения задачи, но также во время периодов отдыха и восстановления.

В работе S. Sakuragi и Y. Sugiyama [2004] исследователи проанализировали отношения трудности задачи, личностных свойств (шкалы теста ММРІ), настроения с вегетативными функциями (показателями ВСР) участников эксперимента (студентки колледжа). Лица с высокими баллами по шкале ипохондрии продемонстрировали после выполнения задачи средней трудности (стадия восстановления) более выраженное преобладание симпатической сердечной активности (повышение показателя LF и снижение HF), чем лица с низкими баллами по этой шкале (сохранение длительное время состояния психического напряжения после окончания задачи). Лица с высокими баллами по шкале психастении характеризовались преимущественным преобладанием симпатической сердечной активности при выполнении задачи средней трудности и парасимпатической сердечной активности после ее выполнения.

В исследовании [Althaus M. et al., 2005] детского темперамента, двум группам детей 8÷12 лет была предложена задача на селективное внимание. Одну из групп составили экстравертированные, вторую – интровертированные здоровые дети. Рассчитывались показатели LF, MF и HF ВСР. При выполнении детьми задачи все спектральные показатели значительно снизились. При этом экстравертированные дети продемонстрировали значительно более выраженное снижение LF и MF компонентов ВСР во время выполнения задачи по сравнению с исходным периодом, чем интровертированные дети. Показатель LF обнаружил значимую корреляцию со степенью экстравертированности и выполнением задачи.

В экспериментах [Heroniemi T., 2004; Heroniemi T. et al., 2004] было проанализировано отношение реакций сердечной деятельности на стрессовые воздействия с предложенными Джеффри Грейем [Gray J.A., 1982] эмоциональными системами торможения поведения (BIS) и приближения поведения (BAS), которые отражают основные свойства темперамента [Gray J.A., 1991]. Сердечные показатели (ЧСС, ДСА, PEP - длительность периода предызгнания желу-



дочков сердца) были записаны в исходном спокойном состоянии и в процессе выполнения различных задач: арифметический тест, задание на время реакции и речевая задача (импровизированная речь). Результаты показали, что чувствительность эмоциональной системы приближения (или активации) поведения была связана с реактивностью сердечного ритма (степенью повышения при стрессовом воздействии) и снижением вагусной сердечной активности (ДСА) во время выполнения задач (особенно, арифметической и речевой). При этом отсутствовала связь с исходными уровнями физиологических показателей. Чувствительность эмоциональной системы торможения поведения не была связана ни с исходным уровнем физиологических показателей, ни с их реактивностью на стрессоры. Авторы сделали вывод, что чувствительность эмоциональной системы приближения связана с реактивностью сердечного ритма, которая вероятно опосредована снижением активности парасимпатки.

В исследовании [Movius H.L., Allen J.J., 2005] анализировалась связь вагусной сердечной активности (ДСА) с различными личностными особенностями, которые оценивались с помощью BIS-BAS шкал C.S. Carver и T.L. White и шкалы социальной желательности Кроуна-Марлоу (оценка дефензивности) при выполнении арифметической задачи. Согласно полученным результатам, индивиды с высоким исходным вагусным тонусом имели повышенные оценки по шкале приближающего поведения (BAS). Результаты не подтвердили гипотезу авторов, что высокий вагусный тонус будет предсказывать снижение сдерживающего поведения (BIS). Высоко дефензивные индивиды демонстрировали сниженный вагусный тонус в покое, но не обнаружили меньшую способность для модулирования вагусной сердечной активности во время выполнения задач и на стадии восстановления.

Исследователей также интересуют вопросы мотивации при воздействии психических нагрузок. В эксперименте L.M. Schleifer и O.G. Okogbaa [1990] исследовалась связь показателей ВСР с различными вариантами времени ответа ЭВМ (медленный и быстрый) при длительном наборе текста с клавиатуры и формами вознаграждения (с денежным поощрением труда и без денежного по-

ощрения труда) у профессиональных машинисток. Было установлено, что ЧСС и артериальное давление не различались значимо при изменении времени ответа компьютерной системы при наборе текста с клавиатуры профессиональными машинистками. В тоже время, денежное поощрение труда значимо увеличивало артериальное давление и снижало ВСР в сравнении с вознаграждением без денежного поощрения (рост психических усилий при выполнении деятельности). В работе Н.С. Veh [1990] исследовался уровень мотивации достижения. Оказалось, что у лиц с низкой мотивацией достижения ЧСС и ВСР не различались до и во время выполнения задач на бдительность, в отличие от лиц с высокой мотивацией достижения. Выполнение задач на бдительность лиц с высокой мотивацией достижения было значимо лучше, чем с низкой. В тоже время, в эксперименте [Myrtek M. et al., 1996] не было обнаружено связи между уровнем психического напряжения (показатели ВСР) в ходе обучения в университете и оценками мотивации достижения, а также уровнем нейротизма и экстравертизма студентов. В исследовании [Mezzacappa E. et al., 1998b] авторы связали мотивационный фактор при выполнении моторных действий агрессивными подростками с симпатической модуляцией низкочастотных колебаний сердечного ритма (LF).

После рассмотрения различных направлений исследований функциональных состояний с помощью показателей ВСР в лабораторных условиях, обратимся к работам, в которых различные психические нагрузки операторов моделировались на полномасштабных тренажерах и в реальных условиях [Dellinger J.A. et al., 1987; Caldwell J.A. et al., 1994; Itoh Y. et al., 1990; Mulder L.J.M., 1992; Roscoe A.H., 1987; Sekiguchi C. et al., 1978; Wilson G.F., 2001; Wilson G.F., 2002a; Ylonen H. et al., 1997; Zhang L.M. et al., 1997]. Пионерами здесь выступают специалисты по авиационной и космической физиологии [Акулиничев И.Т., Баевский Р.М., 1964; Парин В.В., 1968; Ormeer С.Н., Krol J.P., 1973]. Например, А.Н. Roscoe [1976] выполнил специальное исследование на различных типах самолетов и при различных режимах полетов, в котором обосновал ценность использования измерений сердечного ритма для оценки

уровня подготовки пилотов. Чувствительность показателей ВСР к различным фазам полета была установлена в исследовании С. Sekiguchi и его коллег [1978]. Используя спектральный анализ, эта группа ученых выделила два основных частотных пика в состоянии покоя: 0.1 Гц и 0.25÷0.3 Гц [Sekiguchi C. et al., 1979]. Они показали, что при умеренной психической нагрузке во время полета значения пика с частотой 0.1 Гц возрастает, но при дальнейшем росте психической нагрузки - снижается. Авторы сделали вывод, что колебания сердечного ритма с частотой 0.1 Гц находятся, хотя бы частично, под влиянием высших центров мозга. По их мнению, учет факторов влияющих на ВСР может быть очень полезным для улучшения человеко-машинного интерфейса. P.G.A.M. Jorna [1993] в своем исследовании влияния различных периодов полета на физиологические процессы обнаружил у пилотов полную потерю ВСР во время максимальной психической нагрузки – приземления самолета. Чувствительность показателей ВСР к различным уровням психической нагрузки в реальных условиях была подтверждена результатами других экспериментов [Backs R.W. et al., 1994; Itoh Y. et al., 1989; Lindqvist A. et al., 1983; Opmeer C.H., Krol J.P., 1973; Sayers V.McA., 1973].

В исследовании [Tattersall A.J., Hockey G.R., 1995] при выполнении бортиженерами 3-х часовых полетных заданий на авиатренажере моделировались три уровня психической нагрузки, согласно таксономии когнитивного контроля, предложенной Д. Расмуссеном [Rasmussen J., 1983]: мониторинг (визуальный контроль), рутинные операции (основанные на правилах) и проблемные ситуации, требующие принятия решения (основанные на знаниях). Анализировались показатели динамики сердечного ритма (ЧСС, MF и HF), а также допущенные бортиженерами ошибки. Рабочие фазы по техническому обслуживанию самолета классифицировались с помощью анализа видеозаписей деятельности. Согласно полученным результатам, показатель MF понижался во время выполнения действий, требующих решения проблемных ситуаций (высокая психическая нагрузка). Повышение сердечного ритма было связано с фазами взлета и посадки.

В эксперименте [Vicente K.J. et al., 1987] показатели ВСП использовались в качестве индекса психических усилий (напряжения) при выполнении задач на тренажере судна на воздушной подушке. Была обнаружена значимая корреляция нормализованного показателя MF ( $0.06 \div 0.14$  Гц) с субъективными оценками психических усилий. Было установлено, что спектральный анализ ВСП является точным измерением количества психических усилий, которые затрачивает субъект на выполнение задачи. Результаты также показали, что интенсивность психических усилий, затрачиваемых субъектами на выполнение задач, не может быть определена из объективных критериев трудности задачи или из оценок эффективности выполнения.

W.N. Tapp с коллегами [1990] специально исследовали воспроизводимость показателей ВСП вне лабораторных условиях – в процессе учебных полетов на тренажере. Замеры выполнялись в течение трех дней. Исследователи установили, что индивидуальные данные показателей ВСП были очень стабильны в течение всех трех дней эксперимента. Был сделан вывод об отсутствии ограничений в использовании ВСП в реальных жизненных ситуациях, за пределами лабораторных условий. Результаты исследований M.H. Pollak [1991] подтвердили этот вывод: индивидуальные различия в реакциях ЧСС и ВСП в лабораторных условиях (покой, тест на время реакции, видеоигры, арифметический тест) отражали сходные различия и в процессе мониторинга сердечного ритма в течение обычного дня.

Отдельно отметим перспективное направление, связанное с оценками с помощью показателей ВСП эффективности программ обучения, психического напряжения при выполнении учебных полетов, уровня подготовки пилотов, соответствия тренажеров реальным условиям [Jorna P.G.A.M., 1993; Roscoe A.H., 1976]. Например, E. Lindholm и C.M. Cheatham [1983] проанализировали показатели сердечного ритма в процессе обучения на тренажере приземлению на борт авианосца. Они сделали вывод, что частота пульса (ее снижение) может служить надежным индикатором уменьшения психической нагрузки в процессе обучения и роста мастерства при выполнении задач. Использование показате-

лей ВСР для планирования и оценки программ подготовки авиационного персонала представлено в работе [Lee Y.H., Liu B.S., 2003].

Исследования связи показателей ВСР с различными психическими нагрузками не ограничены лишь летными профессиями. Например, в работе [Hansen A.L. et al., 2003] исследовалась связь вагусного тонуса (показатель RMSSD) с эффективностью выполнения задач на кратковременную память и длительное внимание в процессе исполнительской деятельности матросов норвежского флота. На основании медианных значений показателя RMSSD в исходном состоянии покоя (до выполнения задач) были сформированы две группы: (1) - с высоким вагусным сердечным тонусом и (2) - с низким. При выполнении задач на кратковременную память были получены данные в пользу более правильных ответов в первой группе, чем во второй. Достоверно значимый эффект вагусного сердечного тонуса на эффективность выполнения деятельности был получен для длительной исполнительской задачи: группа с высокими значениями RMSSD имела более высокую скорость реакции, большее число правильных ответов и меньше ошибочных действий, чем группа с низкими значениями RMSSD. Авторы сделали вывод, что высокий вагусный сердечный тонус связан с более эффективным выполнением задачи, которые включают в себя длительный контроль исполнительных (моторных) функций.

Важное направление в использовании анализа ВСР занимают исследования психических нагрузок у авиадиспетчеров [Brookings J.B. et al., 1996; Hilburn F.G., 1997]. Например, в исследовании [Backs R.W. et al., 2000] моделировалась деятельность авиадиспетчеров на специальном тренажере (участники – студенты). Были разработаны сценарии с низкой, умеренной и высокой психической рабочей нагрузкой. Высокая и умеренная психическая рабочая нагрузка вызвали значимые реципрокно - зависимые изменения активности СНС (измерялась PEP) и ПНС (HF ВСР). При этом отсутствовали значимые изменения в вегетативных показателях при низкой психической нагрузке, а также значимые различия показателей от уровня психической нагрузки.

Широкое применение показатели ВСР нашли в исследованиях деятельности водителей [Brookhuis K.A. et al., 2003; Roskam A.J. et al., 2002; Verwey W.B., Veltman H.A., 1996]. Современные исследования по психофизиологии деятельности водителей направлены на снижение их ошибочных действий, связанных с ухудшением когнитивных функций из-за утомления, дремоты, перенапряжения [Partin D.L. et al., 2006]. В работе N. Egelund [1982] был сделан вывод, что мощность спектра в частотном диапазоне около 0.1 Гц может служить индикатором процессов утомления у водителей. При этом ЧСС и SDNN не были чувствительны к утомлению водителей. W.H. Janssen и A.W.K. Gaillard [1985] в своем исследовании установили, что показатель ВСР "0.1 Гц компонент" более чувствителен при оценке психической рабочей нагрузки водителей на скоростной автостраде, чем амплитуда P300 компонента вызванных потенциалов биоэлектрической активности мозга. Группа европейских исследователей [Van Winsum W. et al., 1989] также обнаружила эффект психической рабочей нагрузки на среднюю ЧСС и "0.1 Гц компонент". Они установили, что навигация по карте была более трудозатратной (измерялось через снижение мощности в "0.1 Гц компоненте"), чем навигация по голосовым сообщениям. В исследовании [Ronen A. et al., 2002] показатели ВСР оказались чувствительны к низкому (прямая автострада) и высокому (извилистая автодорога) уровню психической нагрузки на водителей.

В экспериментах голландских ученых К.А. Brookhuis и D. De Waard [1993] были отмечены значимые изменения в показателях ЭКГ и ЭЭГ при употреблении алкоголя, которые отражали изменения в состоянии водителей и предсказывали ухудшение вождения. В исследованиях [De Waard D., 1996; De Waard D., Brookhuis K.A., 1997] моделировались различные режимы управления автомобильным транспортом и был сделан вывод, что при возрастании требований задачи, когда водитель инвестирует дополнительные усилия на ее выполнение, происходит значимое снижение мощности спектра сердечного ритма, выраженного показателем "0.1 Гц компонент". Авторы предположили, что показатель "0.1 Гц компонент" может быть оптимальным при диагностике

возросшей сложности задачи, требующей от субъекта усилий для компенсации, чтобы сохранить выполнение деятельности на приемлемом, допустимом уровне.

В исследовании [Lenneman J.K. et al., 2005] на автомобильном тренажере моделировались два типа задач: выполнение одиночной задачи вождения (прямая трасса без встречного движения) и выполнение двойной задачи (дополнительно к вождению моделировалась задача на оперативную память). Дополнительная задача ("n-back task") имела два уровня сложности: низкий и высокий. В анализе использовались результаты по трем экспериментальным условиям: одиночная задача, двойная задача низкого уровня сложности, двойная задача высокого уровня сложности. Был выполнен однофакторный дисперсионный анализ ANOVA (фактор - экспериментальные условия). Результаты выполнения деятельности (ошибки вождения) не зависели от типа задачи и уровня сложности дополнительной задачи. Среди физиологических показателей (ЧСС, РЕР, ДСА) только для частоты сердечного ритма были получены значимые главные эффекты экспериментальных условий. Анализ изменений физиологических показателей от исходного состояния к выполнению задач дополнительно продемонстрировал значимое снижение в показателе ДСА. Авторы отмечают, что физиологические показатели (в данном примере, ЧСС и ДСА) могут быть более полезными для оценки изменений в психической рабочей нагрузке, чем показатели деятельности, из-за более высокой чувствительности.

Группа американских исследователей провела серию экспериментов [Healey J.A., 2000; Healey J.A., Picard R.W., 2000], в которых кратковременные спектральные показатели ВСР и КГР использовались для определения различных уровней нагрузки на водителей. В своей работе [Healey J.A., Picard R.W., 2005] они представили результаты применения одного из метода распознавания образов на основе физиологических показателей для различения трех уровней нагрузки на водителя: состояние покоя, вождение по широкой автостраде и вождение в черте города. Авторы смогли с точностью свыше 97% классифициро-

вать различные уровни нагрузки при вождении у водителей по 5 минутным записям физиологических данных.

Кроме профессий летчика, авиадиспетчера, водителя, динамика ВСП используется также для оценки психической нагрузки в деятельности радиодикторов [Bronis M. et al., 1980], работников вычислительных центров [Баевский Р.М., 1979] и операторов ЭВМ [Овчинников К.В., 2003; Pinkpank T., Wandke H., 1995; Wahlstrom J. et al., 2002], машинистов электропоездов [Myrtek M. et al., 1994] и железнодорожных диспетчеров [Claassen N. et al., 2005], медицинских сестер [Riese H. et al., 2004] и промышленных рабочих [Kang M.G. et al., 2004].

Особым направлением приложений анализа ВСП являются исследования в области инженерной психологии и эргономики. Психическая рабочая нагрузка рассматривается как важный фактор при проектировании и оценке эффективности управления современными авиалайнерами [Bonner M.A., Wilson G.F., 2002; Dussault C. et al., 2004; Hankins T.C., Wilson G.F., 1998; Sirevaag E.J. et al., 1993], при разработке и оценке новейших визуальных средств поддержки авиадиспетчеров [Brookings J.B. et al., 1996; DeSenti C.T. et al., 2001; Jorna P.G.A.M., 1997; Rowe D.W. et al., 1998]. Управление психической рабочей нагрузкой является центральной задачей при создании адаптивных автоматизированных систем [Byrne E.A., Parasuraman R., 1996; Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Rowe D.W. et al., 1998; Scerbo M.W. et al., 2001]. Большое внимание психической нагрузке уделяется при разработке и оценке автоматизированных систем поддержки водителей транспортных средств [De Waard D., 1996; Verwey W.B., Veltman H.A., 1996].

Возрастает интерес исследователей к использованию физиологических показателей для оценки различных типов современных интерфейсов для взаимодействия человека с автоматизированными системами [Ward R.D. et al., 2002]. В 1992 году комитетом ИКАО (International Civil Aviation Organization) FANS (Future Air Navigation System) была разработана концепция CNS/ATM, которая ставит задачу модернизации бортового и наземного оборудования управления воздушным движением, чтобы от взлета до посадки все решения



принимал командир экипажа, а общение экипажа самолета с диспетчерской службой было минимальным (идея "Free Flight"). В рамках этой концепции были выполнены исследования для определения требований к рабочей нагрузке, которую можно переложить на авиадиспетчера во время "свободного полета". В исследовании P.G.A.M. Jorna [1997] в рамках реализации идей "Free Flight" на специальном тренажере анализировались три типа интерфейсов каналов передачи данных между авиадиспетчерами и экипажами самолетов при выполнении задач управления воздушным движением двух уровней сложности (плотности движения). Было установлено, что ВСР ("0.1 Гц компонент" – объективный индикатор психической рабочей нагрузки) возрастает (что указывает на снижение психической нагрузки) как функция повышения качества интерфейсов каналов передачи данных для авиадиспетчеров. Мощность сердечного ритма в частотном диапазоне около 0.1 Гц имела чувствительность к различным уровням сложности задач при всех типах интерфейсов каналов передачи данных. В докладе [DeSenti C.T. et al., 2001] был проанализирован эффект применения новых средств визуализации в процессе управления авиаперевозками на уровень психической рабочей нагрузки авиадиспетчеров. Психическая рабочая нагрузка оценивалась с помощью показателей ВСР (LF и HF), субъективных оценок и анализа результатов деятельности. Результаты продемонстрировали более высокие значения показателей LF и HF (снижение психической нагрузки, рост вагусного сердечного тонуса) при использовании диспетчерами новых средств визуализации при сравнении с обычным инструментарием. Эти данные совпали как с субъективными оценками авиадиспетчеров новых средств визуализации (как требующие меньшего психического напряжения), так и с результатами деятельности (возрастание точности и скорости выполнения).

В исследовании [Sirevaag E.J. et al, 1993] с помощью ВСР сравнивалась психическая нагрузка двух типов коммуникационных форматов (цифрового, через дисплей, и вербального) при выполнении полетов на тренажере современного многофункционального вертолета. ВСР была выше во время вербальной коммуникации. Авторы объясняют это возрастанием влияния дыхания при

вербальных условиях, с одной стороны, и ростом требований визуальной обработки информации при цифровом формате коммуникации, с другой. В эксперименте [Oehme O. et al., 2003] с помощью показателей ВСР не было выявлено различий в психической нагрузке, которое испытывает человек, выполняя задачи с помощью "виртуального дисплея на сетчатке" (VRD - изображение буквально "рисует" лазерным лучом по глазной сетчатке) и жидкокристаллического дисплея (LCD).

Н. Zeier [1979] установил в своем исследовании значимое снижение нагрузки по показателям ЧСС и SDNN при переходе с управления автотранспортом с помощью ручной коробки передач на автоматическую. В исследовании, выполненным Т. Diamon [1992], водители использовали при вождении либо карты, либо автомобильную навигационную систему. Результаты показали, что ВСР (спектральные показатели) была ниже при использовании карт вождения. Согласно данным ВСР, использование навигационной системы снижает психическую нагрузку водителя при вождении.

В работе [Gobel M. et al., 1998] набор психофизиологических методов (включая ВСР и движения глаз) был использован для анализа и проектирования нового рабочего места водителя автобуса с позиций эргономических требований. Сравнение психофизиологических результатов позволило сделать вывод, что эргономические изменения значительно снизили уровень рабочей нагрузки водителя.

Группа исследователей [Mayser C. et al., 2003; Piechulla W. et al., 2003] представила результаты пилотного эксперимента влияния на уровень психической рабочей нагрузки водителей (субъективные оценки, а также ЧСС и MF) различных активных систем помощи: системы поддержания постоянной скорости движения и безопасной дистанции до впереди идущего автомобиля (Adaptive Cruise Control – ACC), системы удержания автомобиля на полосе дороги (Heading Control System - HCS), системы эффективной и безопасной коммуникации по телефону (Adaptive Telephone Behavior - ATB). В исследовании [van Driel C.J.G., van Arem B., 2006] с помощью выполнения 4 различных задач

на автотренажере было проанализировано влияние системы Congestion Assistant ("помощник при заторах") на поведение и рабочую нагрузку водителей. Для оценки рабочей нагрузки использовались физиологические показатели (ЧСС и "0.1 Гц компонент" ВСР).

В работах венгерских ученых [Izso L., Wiethoff M., 1997; Izso L. et al., 1999] спектральные показатели ВСР были использованы для проведения эргономической оценки программного обеспечения компьютеризированной справочной службы, разработанной венгерским отделением компании IBM с целью создания централизованной справочной системы (CDAS).

В докладе [Chen D., Vertegaal R., 2004] представлены предварительные результаты разработки физиологического предупредительного интерфейса пользователя для телефона Nokia, который позволяет регулировать электронную коммуникацию субъекта (e-mail, общение через сеть, телефонные звонки) в зависимости от его актуальных действий (совещание, переговоры, выполнение рабочих обязанностей) и концентрации усилий. Оперативный анализ актуальной рабочей нагрузки для принятия решения о прерывании деятельности субъекта при получении электронного сообщения осуществлялся с помощью показателей ЭЭГ и ЭКГ (HF, MF). Авторы сообщают о положительных предварительных результатах при использовании указанных физиологических показателей для диагностики различных уровней концентрации усилий (внимания) и принятия решения об электронной коммуникации (83% правильно классифицированных состояний).

Одно из перспективных современных направлений, в которых используется математический анализ ВСР, – это развитие адаптивных средств поддержки операторов на основе физиологических показателей [Hoover A., Muth E.A., 2004; Lee J. et al., 2004; Scerbo M.W. et al., 2001]. Например, в эксперименте G.F. Wilson и его коллег [1999] моделировались задачи операторской деятельности и было получено снижение ошибок задач слежения на 44% и ошибок мониторинга ресурсов на 33% при использовании адаптивных средств поддержки. В отчетах, выполненных группой ученых NASA под руководством L.J. Prinzel

3rd. [Prinzel L.J. 3rd et al. 2001; Prinzel L.J. 3rd, 2002; Prinzel L.J. 3rd et al. 2003] отмечают преимущества применения физиологических показателей (включая ВСР) в адаптивной автоматике: получение измерений за длительный период с незначительными неудобствами для оператора; контроль низких уровней рабочей нагрузки при взаимодействии оператора с автоматикой, когда возникают трудности измерения затрачиваемых усилий с помощью результатов деятельности. В работах [Byrne E.A., Parasuraman R., 1996; Kramer A.F. et al., 1996; Morrison J.G., Gluckman J.P., 1994; Scerbo M.W., 1996] делается вывод в пользу трех психофизиологических измерений, которые наиболее вероятно могут быть использованы в адаптивной автоматике: ЭЭГ, вызванные потенциалы (ERP) и ВСР.

В отчете [Prinzel L.J. 3rd et al. 2003] содержатся данные выполненного авторами эксперимента, в котором исследовалась эффективность анализа ВСР (ЧСС, ДСА, "0.1 Гц компонент") для оценки уровней рабочей нагрузки, и определялись показатели, которые можно было бы использовать в адаптивной автоматике в режиме реального времени. 30 участников эксперимента выполняли три задачи на тренажере: слежение и управление курсором в целевой области экрана дисплея, контроль систем двигателя, контроль и поддержание заданного уровня топлива в авиационных баках. Каждая задача имела три уровня сложности. Дополнительно анализировались показатели выполнения задач и субъективные оценки рабочей нагрузки. Все показатели ВСР хорошо различали исходное состояние с выполнением задач. Для ДСА существовал тренд к снижению значений с ростом уровня сложности задач, но эта тенденция не была значима. Показатель "0.1 Гц компонент" значительно различался при сравнении высокой нагрузки с низкой и средней. При этом между низким и средним уровнем различия были не значимы. Авторы сделали вывод, что "0.1 Гц компонент" обладает чувствительностью только при использовании высокого уровня рабочей нагрузки.

В различных работах [Dussault C. et al., 2004; Wilson G.F., 2002b] обосновывается важность контроля психической нагрузки, как критического фактора

при проектировании и эксплуатации современных и модифицированных авиалайнеров. Главный вопрос - сможет ли экипаж управлять этими сложными автоматизированными системами безопасно и эффективно, когда роль автоматики становится доминирующей. Эксплуатация современных и модифицированных авиалайнеров требует постоянного мониторинга функциональных состояний монотонии и утомления для оперативного регулирования рабочей нагрузки пилотов. Для оценки рабочей нагрузки в условиях выполнения реального полета в исследовании [Dussault C. et al., 2004] авторы использовали показатели ЭЭГ и ЭКГ. Полученные результаты позволили сделать вывод о чувствительности сердечного ритма к различным уровням активности летчиков: ЧСС возрастала в течение активных сегментов и падала во время периодов отдыха.

Ряд исследователей специально использует показатели ВСР для анализа различных параметров рабочего места: температуры, освещенности, шума, состава воздуха [Carter N.L., Beh N.C., 1989; Brenner I.K. et al., 1997; Eninger R.M., Rosenthal F.S., 2004; Ishibashi K., Yasukouchi A., 1999; Lang E. et al., 1994; Magari S.R. et al., 2001, 2002; van Amelsvoort L.G.P.M. et al., 2000]. В работах [Ishibashi K. et al., 2007; Mukae H., Sato M., 1992] с помощью показателей ВСР были изучены эффекты цветовой температуры источников света и уровней освещенности на ВНС человека. В эксперименте [Yokoі M. et al., 2006] исследовались влияния на показатели ВСР воздействий ярким и слабым светом (2800 и 120 люкс) в покое и в процессе выполнения умственных задач (тест Струпа, каждый час по 15 минут) в условиях выраженной депривации ночного сна (с 21.00 до 04.30 часов). Было установлено, что яркое освещение замедляет снижение ЧСС в периоды отдыха в процессе депривации ночного сна. Также яркое освещение вызывало рост симпатической и снижение парасимпатической активности при выполнении теста Струпа. Данная динамика показателей ВСР в процессе теста Струпа отсутствовала при слабом освещении. В экспериментах [Hasebe Y. et al., 1995; Sollers J.J. 3rd. et al., 2003] показатели ВСР служили оценками теплового комфорта и влияния внешней температуры на человека. В исследовании [Yamamoto S. et al., 2007] была обоснована возможность исполь-

зования показателей ВСР в качестве индексов воздействия высоких температур на ВНС человека. Отношение HF/(HF+LF) значительно снижалось, а LF/HF и ЧСС – возрастали в условиях повышенной температуры (35С°). Статья [Tzaneva L. et al., 2001] посвящена лабораторному исследованию эффекта 135 минутного воздействия шума с интенсивностью 95 Дб. В исследованиях [Barker A.T. et al., 2007; Parazzini M. et al., 2007] с помощью показателей ВСР были проанализированы эффекты воздействия на ВНС человека электромагнитных полей при различных режимах работы сотовых телефонов для GSM и TETRA стандартов мобильной связи. В эксперименте [Miyake S. et al., 2002] исследовалось влияния концентрации негативных ионов в воздухе (аэроионов) на показатели ВСР, выполнение деятельности и настроение. В эксперименте [Cavallari J.M. et al., 2007] приняли участие сварщики котлов. С помощью суточных показателей ВСР (SDNN, RMSSD) были исследованы эффекты воздействия в процессе деятельности тонкодисперсных частиц (ТЧ 2.5) с высокой концентрацией тяжелых металлов. Авторы установили устойчивую обратную зависимость между уровнем концентрации тонкодисперсных частиц и всеми показателями ВСР. Наиболее выраженными эти изменения были в ночное время. В исследовании [Lee M.S. et al., 2004] динамика показателей ВСР была использована для сравнительного анализа эффектов ношения одежды из современной многофункциональной ткани и одежды из хлопка. Разнообразные исследования влияния элементов природы на жизнедеятельность человека, выполненные японскими учеными, позволили S. Miyake [2003] определить специальное научное направление - "Природная психофизиология" (*Nature Psychophysiology*), которое подчеркивает важность методов психофизиологии (включая и показатели ВСР) при анализе воздействия зрительных, звуковых и обонятельных стимулов природы на функциональное состояние и эффективность деятельности человека на рабочем месте.

Значительное число исследований было выполнено для изучения таких факторов, влияющих на профессиональную деятельность, как режим работы, содержание труда [Furlan R. et al., 2000; Ha M. et al., 2001; Matsuzaki I. et al.,

1996; Munakata M. et al., 2001; Ritvanen T. et al., 2004; Sasaki T. et al., 1999; Sloan R.P., 1994; van Amelsvoort L.G. et al., 2000]. Например, Т. Кageyama с коллегами [1998a] в своем исследовании рассмотрел возможные эффекты длительности ежедневных поездок на работу из пригорода и обратно, а также продолжительность сверхурочной работы на показатели ВСП (LF, HF, LF/HF). Эта же группа исследователей [1998b] проанализировала связь количества стрессоров на рабочем месте (субъективная оценка) с качеством сна (самоотчеты) и вегетативной активностью (ВСП в дневное время) у конторских служащих. В исследовании [Stephoe A. et al., 2002] анализировалась связь социально-экономического статуса (три уровня должностного положения: низкий, средний и высокий) с показателями артериального давления и ВСП (RMSSD – вагусная сердечная активность). В полевом исследовании [Ishii N. et al., 2004] были проанализированы эффекты сменной работы медицинских сестер на сердечные вегетативные функции, которые измерялись показателями ВСП. В эксперименте [Zhong X. et al., 2005] с помощью спектральных показателей ВСП исследовались эффекты депривации сна (36 часов) на ВНС в условиях покоя (лежа и сидя) и при выполнении компьютерных задач на внимание. Авторы пришли к выводу, что депривация сна связана с ростом симпатической и снижением парасимпатической сердечной активности.

Ряд исследований была посвящено проверке модели рабочего напряжения, предложенной R.A. Karasek [1979]. В них оценивались эффекты уровня требований задачи и свободы принятия решения на показатели ВСП. Например, в работе [Collins S.M. et al., 2005] было установлено, что высокие требования к работе и малые возможности участия в принятии решений (что соответствует высокому уровню рабочего напряжения по R.A. Karasek) были связаны с устойчивым снижением сердечного вагусного контроля (HF) как во время работы, так и отдыха. Высокие требования к работе также были связаны с повышенным симпатическим сердечным контролем во время рабочих часов.

В работе [Vrijkotte T.G. et al., 2000] вагусный сердечный тонус (RMSSD) был проанализирован как возможный детерминант эффектов рабочего напря-

жения у конторских служащих. Рабочее напряжение определялось согласно модели дисбаланса усилий и вознаграждения, предложенной J. Siegrist [1996]. Было установлено значимое повышение сердечного ритма и снижение вагусного сердечного тонуса в группе с высоким дисбалансом усилий и вознаграждения. При этом связь вегетативных показателей с копинг-стратегиями не была установлена. В исследовании [Hanson E.K. et al., 2001] модель дисбаланса усилий и вознаграждений использовалась для оценки динамики мощности в HF диапазоне (ДСА) в течение рабочего дня у представителей двух профессий: медицинские работники и офисные служащие. Результаты показали, что баланс между усилиями и вознаграждением имел положительный эффект на мощность в HF диапазоне в течение дня: у субъектов с высоким балансом вагусный сердечный тонус повышался в течение рабочего дня. Также было установлено, что потребность во внешнем контроле на рабочем месте имела негативную связь с показателем HF: субъекты с высокой потребностью во внешнем контроле на рабочем месте показали более низкий вагусный сердечный тонус.

Отдельно остановимся на результатах отечественных исследований функциональных состояний, в которых использовались методы анализа вариабельности сердечного ритма.

Отечественные исследователи обратились к проблеме регуляции сердечного ритма при умственной работе еще в начале 70-х годов XX столетия [Баевский Р.М., Кудрявцева В.И., 1975]. В исследовании В.В. Копаева и его коллег [1970] представлена попытка использования показателей сердечного ритма в условиях производственной деятельности. Разнообразные экспериментальные исследования умственных нагрузок с помощью ВСР представлены в работах [Демина Д.М. и др., 1986; Романов В.В. и др., 1984]. В исследовании А.В. Карпенко [1986] была показана высокая эффективность использования математического анализ сердечного ритма для изучения механизмов информационно-аналитической деятельности человека. В экспериментах А.И. Станкуса и Е.Н. Соколова [1984а, 1984б], О.В. Коркушко с коллегами [1991] при моделировании умственной нагрузки было отмечено снижение ВСР в высокочастотном



диапазоне. В монографии Р.М. Баевского и его соавторов [1984], посвященной математическому анализу сердечного ритма, психическая нагрузка была рассмотрена как один из стресс-факторов. Ими была предложена классификация состояний, основанная на представлении об уровне адаптированности организма к условиям среды. П.Л. Салманов [1993] проанализировал связь личностных особенностей испытуемых с изменениями ритмограммы сердца при сообщениях о результатах выполнения деятельности. О.Ю. Майоров [1990], исследуя эмоционально напряженную деятельность и эмоциональный стресс, на основе показателей ВСП предложил индекс тревоги и типа реакции тревоги.

В отечественных исследованиях большое внимание уделялось контролю функционального состояния при выполнении профессиональных обязанностей [Батова Н.Л., 1994; Григорович В.Д. и др., 1990; Данилова Н.Н., 1992; Демина Д.М. и др., 1986; Казаков М.И., Братанова В.В., 1991; Сидтиков Ф.Г. и др., 2001]. В экспериментах анализировались длительные психические нагрузки и вызванные ими негативные процессы монотонии и утомления [Самко Ю.Н., и др., 1992]. А.Я. Каплан [1999] моделировал операторскую деятельность с различной обратной связью и получил наиболее выраженное снижение высокочастотного компонента ВСП при обратной связи на ошибочное действие. Он сделал вывод о целесообразности использования оценок ВСП у человека-оператора для тестирования эргономических свойств систем "человек-машина". Согласно исследованиям А.Н. Флейшмана [1999b], редукция LF-колебаний сердечного ритма соответствует состоянию внутренней сосредоточенности, направленной на переработку имеющейся информации. В эксперименте К.В. Овчинникова [2003] была выполнена оценка динамики ВСП операторов во время работы за компьютером.

Проанализировав теоретические и практические аспекты использования анализа показателей ВСП, Р.М. Баевский и Г.Г. Иванов [2001] сделали вывод, что вариабельность сердечного ритма хорошо отражает степень напряжения регуляторных систем (активации гипоталамо-гипофизарно-адреналовой и симпатико-адренормедуллярной систем) в ответ на любое стрессорное воздействие.

Представленные в данном параграфе материалы исследований убедительно доказывают растущий интерес исследователей к использованию показателей ВСР в изучении функциональных состояний человека при воздействии различных психических нагрузок. Измерения сердечно сосудистой активности, согласно многочисленным авторам, были наиболее популярными физиологическими показателями, используемыми для этих целей за последние 30 лет [Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003; Scerbo M.W. et al., 2001; Wierwille W.W., Eggemeier F.T., 1993; Wilson G.F., 2001]. В недавнем обзоре технических средств для физиологических измерений [Fahrenberg J., Wientjes C.J.E., 2000], авторы оценили сердечно-сосудистые показатели (ЧСС, ВСР) как наиболее удобные и пригодные для полевых исследований в связи с их надежностью, ненавязчивостью и простотой регистрации. Эти положительные свойства регистрации variability сердечного ритма были отмечены группой исследователей НАТО [Balkin T. et al, 2004], которые проанализировали различные физиологические показатели для оценки функциональных состояний операторов. Экспертами американского комитета по метаболическому контролю [Monitoring metabolic status, 2004] анализ ВСР был рекомендован для прогнозирования ухудшения физиологического состояния и когнитивных процессов военнослужащих армии США в боевых условиях. Согласно их рекомендациям, ВСР отражает активность головного мозга, которая лежит в основе деятельности внимания и эмоционального состояния человека. Показатели ВСР можно использовать для оценки уровня стресса, степени утомления, которые оказывают негативное влияние на когнитивные процессы в реальных полевых условиях. В отчете [Farmer E., Brownson A., 2003], подготовленном в рамках программы Европейской комиссии по безопасности полетов и аэронавигации (Eurocontrol) "Integra", была представлена критическая оценка эффективности различных показателей для контроля рабочей нагрузки человека при деятельности на тренажере авиадиспетчера. По результатам анализа такие показатели как сердечный ритм и ВСР были рекомендованы для использования в дальнейших исследованиях программы Eurocontrol "Integra".

И все же, результаты многочисленных исследований, в которых показатели ВСП использовались для оценки влияний психических нагрузок на функциональное состояние человека-оператора, высветили ряд существенных противоречий, на которых мы остановимся в заключительном параграфе данной главы.

#### **1.4. ОСНОВНЫЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АНАЛИЗА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА В ИССЛЕДОВАНИЯХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ**

В исследованиях психической рабочей нагрузки, которая воздействует на индивидов в процессе выполнения профессиональной деятельности, ученых интересует, в первую очередь, *чувствительность* и *диагностичность* психофизиологических показателей [Veltman J.A., 2002; Wierwille W.W., Eggemeier F.T., 1993]. Под чувствительностью понимают способность показателя дифференцировать различные уровни психической нагрузки (включая состояние покоя и выполнение задачи). Диагностичность имеет отношение к способности показателя дифференцировать различные типы психической нагрузки (например, нагрузка на внимание, восприятие, память или мышление) [O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986; Scerbo M.W. et al., 2001]. Подобно тому, как это делается в психофизике, можно выделить *абсолютную чувствительность* - способность физиологического показателя дифференцировать состояние покоя и психическую рабочую нагрузку (покой – нагрузка), и *дифференциальную чувствительность* - способность физиологического показателя дифференцировать различные уровни психической рабочей нагрузки (уровень нагрузки 1 – уровень нагрузки 2).

Наиболее обширный материал накоплен относительно чувствительности показателей ВСП к различным уровням психической рабочей нагрузки. Рассмотрим противоречия в чувствительности отдельных показателей ВСП, которые содержат результаты лабораторных исследований.

Первоначально показатели ВСП представлялись исследователям как индикаторы психической нагрузки, обладающие не только абсолютной, но и дифференциальной чувствительностью [Blitz P.S., 1970; Hancock P.A. et al., 1985; Kalsbeek J.W.H., Ettema J.H., 1963; Porges S.W., Raskin D.C., 1969]. В последующем эта точка зрения нашла свое подтверждение в ряде лабораторных экспериментов, например, относительно показателей MF (или "0.1 Гц компонент") [Aasman J. et al., 1987; Fournier L.R. et al., 1999; Mulder G., Mulder L.J.M., 1980; Mulder L.J.M., 1992; Roscoe A.H., 1992]. В тоже время, возрастало число лабораторных исследований, в которых делался вывод лишь об абсолютной чувствительности показателей ВСП к различным уровням психических нагрузок. Так в работах [Boutcher S.H. et al., 1998; Fairclough S.H., Houston K., 2004; Jorna P.G.A.M., 1992; Nickel P., Nachreiner F., 2003; Tripathi K.K. et al., 2003] говорится лишь о значимом снижении показателей LF и MF от исходного состояния к выполнению задач различной сложности. Более единодушны были выводы исследователей относительно дифференциальной чувствительности ЧСС: рост показателя при возрастании уровня сложности задачи [Boutcher S.H. et al., 1998; Fournier L.R. et al., 1999; Tripathi K.K. et al., 2003]. Но и для ЧСС существуют отчеты, в которых подобная зависимость отсутствовала [Kalsbeek J.W.H., Ettema J.H., 1963; Salvendy G., Humphreys A.P., 1979].

В исследованиях на тренажерах преобладают результаты, которые подтверждают лишь абсолютную чувствительность показателей ВСП [Brookings J.B., 1996; Cnossen F. et al., 2000; Jorna P.G.A.M., 1992; Lee Y.H., Liu B.S., 2003; Lenneman J.K. et al., 2005; Rau R., 1996; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1996; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1998]. Например, W.W. Wierwille и S.A. Connor [1983] не обнаружили значимых изменений показателя SDNN при возрастании сложности заданий (три уровня), выполняемых на авиатренажере. Но ряд исследователей получили данные в пользу дифференциальной чувствительности показателей ВСП [Lindqvist A. et al., 1983; Opmeer C.H., Krol J.P., 1973; Sirevaag E.J. et al., 1993]. Например, в работе P.G.A.M. Jorna [1997] были проанализированы различные интерфейсы для авиадиспетчеров и получены убедительные

доказательства в пользу чувствительности показателя "0.1 Гц компонент" к различным уровням психической нагрузки. В исследовании J.A. Veltman и A.W. Gaillard [1993] было установлено, что ВСР в условиях выполнения различной сложности сценариев полетных заданий прекрасно отражает изменения в уровне нагрузки. В эксперименте [Van Winsum W. et al., 1989] показатели ВСР оказались чувствительны к психической нагрузке при навигации водителей по карте и по голосовым сообщениям. F.G. Hilburn [1997] использовал различные физиологические показатели, включая и ВСР, для оценки психической рабочей нагрузки авиадиспетчеров в процессе управления на специальном тренажере воздушным движением в ручном и автоматическом режиме. Моделировалось низкий и высокий уровни сложности задачи: контроль за 3 и 10 самолетами. Согласно данным исследования, показатель ВСР ("0.1 Гц компонент") оказался чувствительным к изменениям требований задачи по уровню контролируемого числа самолетов (дифференциальная чувствительность). При этом уровень психической нагрузки был выше для ручного режима управления, в сравнении с автоматическим (более низкие значения мощности спектра в LF диапазоне при ручном контроле), для обоих уровней сложности. В эксперименте С.Т. DeSenti и его коллег [2001] показатели спектральной мощности сердечного ритма в диапазонах LF и HF также продемонстрировали дифференциальную чувствительность к различным уровням психической нагрузки в процессе использования различных средств визуализации для работы авиадиспетчеров.

Противоречивые данные были получены в ходе тренажерных экспериментов и для показателя ЧСС. В исследованиях [Lindholm E. et al., 1984; Opmeer С.Н., Krol J.P., 1973; Svensson E. et al., 1997; Veltman J.A., Gaillard A.W. 1996; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1998; Wierwille W.W., Connor S.A., 1983] был сделан вывод в пользу дифференциальной чувствительности ЧСС к уровню сложности полетного задания, в эксперименте [Collet С. et al., 2003] - к уровню сложности управления воздушным движением, в работе [Jorna P.G.A.M., 1997] - к различным интерфейсам для авиадиспетчеров, в исследовании [Cnossen F. et al., 2000] – к уровню требований задачи при вождении на автотренажере. В то-

же время в исследованиях [Casali J.G. et al., 1983; Dussault C. et al., 2005; Thackray R.I. et al., 1975; Wierwille W.W. et al., 1985] ЧСС не различалась при выполнении когнитивных задач различной сложности во время тренажерных полетов и значимо отличалась лишь при сравнении исходного уровня с различными фазами полета (абсолютная чувствительность). В пользу лишь абсолютной чувствительности ЧСС говорят и данные экспериментов R. Rau [1996] при выполнении задач на тренажере электрической распределительной системы и T.G. Hicks, W.W. Wierwille [1979] - на автотренажере.

Результаты исследований, выполненных в реальных условиях, более последовательны. Данные работ [Comens P. et al., 1987; Dussault C. et al., 2004; Lewis C.E. et al., 1967; Nicholson A.N. et al, 1970; Roscoe A.H., 1975; Roscoe A.H., 1980; Roscoe A.H., 1984; Roscoe A.H., 1992; Ruffell-Smith H.P., 1967; Speyer J.J. et al, 1987; Wilson G.F., 1993] продемонстрировали, что ЧСС может служить удобным индикатором уровня психической нагрузки, вызванной различными периодами полета (дифференциальная чувствительность). В исследованиях [Hankins T.C., Wilson G.F., 1998; Wilson G.F., 2001] были получены данные, доказывающие, что ЧСС чувствительна к различным уровням психической нагрузки во время полета, а показатели MF и HF нет. В исследованиях [Wilson G.F., 1993; Wilson G.F. et al., 1994] не было обнаружено значимой связи показателя MF с различными уровнями психической нагрузки во время полета, а в исследовании [Verwey W.B., Veltman H.A., 1996] с выполнением водителями дополнительных (вторичных) задач. Результаты эксперимента [Itoh Y. et al., 1989] позволяют сделать вывод в пользу лишь абсолютной чувствительности показателя "0.1 Гц компонент" ВСР, который различал лишь ситуации с высокой рабочей нагрузкой (снижение значений при взлете и посадке) и ситуации, когда рабочая нагрузка была близка к исходной (полет по маршруту на автопилоте). И в других исследованиях [Jorna P.G.A.M., 1992; Wilson G.F., 1992; Wilson G.F., 2001], в которых приняли участие пилоты, также не было обнаружено дифференциальной чувствительности показателей ВСР к выполнению полетных заданий различной сложности в реальных условиях, а полученные

данные свидетельствовали в пользу лишь их абсолютной чувствительности. В недавнем исследовании влияния различных автоматизированных систем поддержки на психическую нагрузку водителей [Ostlund J. et al., 2004] авторы установили чувствительность сердечного ритма и показателя "0.1 Гц компонент" ВСР лишь к различиям между задачами вождения и исходным состоянием (абсолютная чувствительность). Чувствительность к уровню трудностей задач (дифференциальная чувствительность) была не значима.

В работах немецких ученых P. Nickel и F. Nachreiner были специально проанализированы основные психометрические свойства (диагностичность и чувствительность) показателя "0.1 Гц компонент" ВСР, как одного из часто используемого для оценки психической нагрузки. В исследовании [Nickel P., Nachreiner F., 2000] психическая нагрузка моделировалась по типу и уровням с помощью набора стандартизированных задач AGARD-STRES. Согласно полученным результатам, "0.1 Гц компонент" ВСР (измерялся в частотном диапазоне  $0.07 \div 0.14$  Гц) обладал лишь абсолютной чувствительностью к психической нагрузке (значимое снижение значений показателя "0.1 Гц компонент" при переходе от покоя к выполнению задачи). Исключение составила задача на грамматические умозаключения – величина показателя "0.1 Гц компонент" не изменилась. Не было получено доказательств в пользу дифференциальной чувствительности и диагностичности анализируемого показателя для данного набора задач. Авторы сделали вывод, что "0.1 Гц компонент" ВСР является скорее индикатором эмоционального напряжения (реакцией на эмоциональную нагрузку) или общей активности (спешки, тревожности), чем психического или когнитивного напряжения. Данный вывод авторы подтвердили в своем следующем эксперименте [Nickel P., Nachreiner F., 2001], в котором они воспользовались модифицированной AGARD-STRES батареей задач, выполняемой с разным темпом, который самостоятельно устанавливался индивидом или определялся ЭВМ. В 2002 году они опубликовали исследования динамики показателя "0.1 Гц компонент" ВСР в реальном и моделируемом рабочем окружении: общественный транспорт и управление производственным

процессом [Nickel P., Nachreiner F., 2002]. Анализируя полученные данные, они пришли все к тому же неутешительному для данного показателя выводу. В следующем эксперименте [Nickel P., Nachreiner F., 2003] авторы использовали 14 психологических задач из батареи Консультативной Группы по Аэрокосмическим Исследованиям и Развитию Стандартизированных Тестов для Исследования Стрессоров Окружающей Среды. Была получена значимая чувствительность показателя "0.1 Гц компонент" лишь для дискриминации между выполнением задач и состоянием покоя (абсолютная чувствительность), но отсутствовали доказательства в пользу дифференциальной чувствительности (дискриминация между уровнями сложности задачи) и диагностичности (дискриминация между задачами). Авторы подтвердили свой первоначальный вывод, что "0.1 Гц компонент" может служить индикатором спешки или эмоционального напряжения при выполнении, но не психической рабочей нагрузки.

С этой точкой зрения согласуются результаты эксперимента [Jahn G. et al., 2005], в котором моделировались различные уровни психической нагрузки при вождении автомобилем: высокие требования по обработке информации и высокие требования по управлению автомобилем (ВВ), низкие требования по обработке информации и низкие требования по управлению автомобилем (НН). Каждый уровень моделировался дважды, вождение начиналось с высокого уровня нагрузки и далее она чередовалась: ВВ1-НН1-ВВ2-НН2. Дополнительно водители в процессе движения должны были реагировать на световые сигналы в периферическом поле зрения (вторичная задача). Кроме субъективных оценок рабочей нагрузки авторы использовали показатель ВСП ("0.1 Гц компонент"). Согласно полученным результатам, показатель ВСП снижался значимо только в пробе ВВ1. Авторы предположили, что "0.1 Гц компонент" чувствителен к эмоциональному напряжению, которое было наивысшим в начальной пробе. По мере выполнения проб эмоциональное напряжение снижалось, а показатель ВСП значимо не изменялся относительно исходного состояния.

Противоречивость результатов характерна не только для исследований чувствительности и диагностичности показателей ВСП к различным уровням и



типам психической нагрузки, но также и для анализа динамических изменений показателей ВСП при воздействии различных психических нагрузок. Как отмечалось ранее, многие исследователи получили подтверждение снижения различных показателей ВСП при действии психических нагрузок [Hilburn F.G., 1997; Jorna P.G.A.M., 1997; Mulder G., Mulder-Hajonides van der Meulen W.R.E.H., 1973]. Например, в экспериментах [Данилова Н.Н., 1995; Sloan R.P. et al., 1996] выполнение арифметического теста сопровождалось значимым снижением показателей LF и HF. Но в работе Н.Н. Даниловой [1998] арифметические задания вызывали значимое снижение только показателя LF. В исследовании [Boutcher S.H. et al., 1998] были проанализированы показатели ВСП при выполнении участниками либо арифметической задачи, либо теста Струпа. Согласно полученным результатам, не существовало значимых различий в показателях ВСП между покоем и выполнением арифметической задачей. Однако ВСП снизилась значимо как в MF (0.07÷0.11 Гц), так и HF (0.12÷0.40 Гц) диапазонах, когда выполнялся тест Струпа, при сравнении с исходным состоянием. В эксперименте [Tripathi K.K. et al., 2003] показатели общей мощности спектра, LF и MF значимо снижались при выполнении заданий на оперативную память, длительную концентрацию внимания и сложную сенсомоторную реакцию. Но данная динамика отсутствовала для показателя HF.

Ряд исследователей полагает, что снижение низкочастотных компонентов сердечного ритма (LF, MF), как правило, указывает на состояние повышения психического напряжения, а повышение LF - на состояние снижения психического напряжения [Byrne E. A. et al., 1995; Mulder L.J.M., Mulder G., 1987; Rowe D.W. et al., 1998]. Но в экспериментах [Hjortskov N. et al., 2004; Oishi K. et al., 1999; Van Roon A.M., 1998] было обнаружено отсутствие значимых изменений в LF показателе при воздействии различных психических нагрузок, при этом показатель HF значимо снижался. Также М. Sakakibara [1992] при выполнении студентами колледжа теста "зеркальный рисунок" зафиксировал значимое снижение ДСА, при этом мощность спектра в LF диапазоне не изменялась. В лабораторном эксперименте [Hjortskov N. et al., 2004] авторы проанализировали

влияние различных стрессоров (когнитивных, эмоциональных) на ВСР при выполнении операций на ЭВМ. Было обнаружено значимое снижение показателя HF при воздействии дополнительных стрессоров. При этом отсутствовали значимые изменения в LF показателе. В исследовании [Langewitz W., Ruddle H., 1989] обследуемым предъявлялись две психические задачи: тест на время реакции и арифметический тест. Хотя обе задачи значимо увеличили среднюю ЧСС, но при этом мощность спектра показателя "0.1 Гц компонент" значимо снизилась только во время выполнения теста на время реакции и осталась неизменной для арифметического теста. Группа ученых [Janssen W.H. et al., 1994] проанализировала прототип интеллектуального транспортного средства и не обнаружила значимых эффектов на "0.1 Гц компонент" спектра сердечного ритма при сравнении контрольной группы с группой водителей, которая получала интеллектуальную поддержку. Исследуя эффекты рабочей нагрузки на ВСР ("0.1 Гц компонент"), японские ученые [Sekiguchi C. et al., 1979] обнаружили, что при умеренной психической нагрузке во время полета значения пика с частотой 0.1 Гц возрастают, но при дальнейшем росте психической нагрузки снижаются.

Любопытная динамика была отмечена в работе [Sato N. et al., 2003] при выполнении различных задач: арифметический тест и проход с помощью компьютерной "мыши" по маршруту на экране монитора, когда горизонтальная и/или вертикальная ось "мыши" были инвертированы. Было установлено, что LF показатель значимо повышался, а HF снижался во время выполнения задач при сравнении с исходным состоянием и периодом восстановления (после выполнения заданий). Эти результаты подтверждаются данными других экспериментов. В исследовании [Pagani M. et al., 1989] в процессе выполнения арифметического теста показатель LF повышался, а HF – снижался. В исследовании [Pagani M. et al., 1991] моделировалась стрессовая ситуация для собак и психическая нагрузка (арифметическая задача) для людей. Было получено значимое повышение под нагрузкой мощности спектра колебаний R-R интервалов в LF компоненте как у животных, так и у людей. В исследовании [Delaney J.P., Brodie D.A., 2000] испытуемые выполняли тест Струпа в условиях мотива конку-

ренции и денежного побуждающего мотива. Анализ результатов продемонстрировал значимое снижение SDNN и HF, рост ЧСС и LF. Существовало также значимое возрастание в отношении LF/HF. В исследовании [Garde A.H. et al., 2002] не было обнаружено изменений нормированных показателей  $LF_{nu}$  и  $HF_{nu}$  в ответ на психическую нагрузку, моделируемую компьютерным вариантом теста Струпа.

Противоречивые данные получены также и относительно показателя SDNN. Еще в первых работах [Bowers K.S., Keeling K.R., 1971; Kalsbeek J.W.H., Ettema J.H., 1963; Porges S.W., Raskin D.C., 1969] было продемонстрировано снижение общей variability сердечного ритма (SDNN) с ростом психической нагрузки. Но выполнение теста на сложную сенсомоторную реакцию в исследовании [Ishibashi K., Yasukouchi A., 1999] и задачи слежения за показаниями приборов в работе [Sekiguchi C. et al., 1978] сопровождалось парадоксальным ростом стандартного отклонения сердечного ритма. В эксперименте [Sloan R.P. et al., 2001] выполнение арифметического теста и теста Струпа вызвали значимое возрастание ЧСС и снижение показателей BCP (RMSSD, HF, LF, MF), за исключением SDNN.

Ряд исследователей пытались проанализировать причины противоречий в результатах анализа BCP при воздействии психических нагрузок [Farmer E., Brownson A., 2003; Kramer A.F., 1991; Lenneman J.K., Backs R.W., 2003]. К наиболее существенным факторам, которые могут объяснить противоречия в результатах данных исследований, относятся: мотивация испытуемых, уровень сложности экспериментальных задач, речь, движения, возраст и пол, дыхание, гетерогенность индивидуальной динамики, корректное использование статистического анализа. Остановимся на них поподробнее.

Фактор мотивации и ответственности за последствия ошибочных действий при оценке психической напряженности подчеркивается многими исследователями [De Waard D., 1996; Firth P.A., 1973; Jorna P.G.A.M., 1993; Rouse W.B. et al., 1993; Straussberger S. et al., 2004; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1993]. Как справедливо замечает Г.И. Сидоренко с соавторами [2004], требование арифме-

тического теста непрерывно прибавлять 17 к определенному числу вряд ли вызовет достаточную мотивацию и концентрацию внимания участников в процессе исследований. То же касается и речевого теста, который используется во многих исследованиях для моделирования эмоциональной нагрузки. Участникам предлагается подготовить в течение 5 минут краткую речь по заданной теме (это может быть оправдательное выступление по поводу ложного обвинения в магазинной краже, либо волнующий участника вопрос), которая записывается на видеокамеру. Но данная процедура недостаточно стандартизирована и далеко не все участники с требуемой мотивацией и заинтересованностью готовят свое экспериментальное выступление [Сидоренко Г.И. и др., 2004].

Роль мотивации наглядно показана в серии экспериментов на летчиках [Bonner M.A., Wilson G.F., 2002; Wilson G.F. et al., 1989]: при учебном имитировании нарушений во время полета, которые требовали рутинных операций для их устранения, не было обнаружено статистически значимого возрастания значений ЧСС, в то же время реальные аналогичные внештатные ситуации приводили к 50% росту ЧСС. В работе [Rowe D.W. et al., 1998], в которой моделировалась реальная деятельность авиадиспетчеров, наблюдались существенные различия в динамике показателей ВСП при выполнении задач специалистами, четко представляющими последствия своих действий, и неискушенными испытуемыми. В экспериментах [Hart S.G., Hauser J.R., 1983; Kakimoto Y. et al., 1988; Roscoe A.H., 1978] было установлено, что во время реальных полетов ЧСС у командиров экипажей – первых пилотов (ответственных за выполнение полетного задания и безопасность пассажиров) значимо выше, чем у их помощников - вторых пилотов. В исследовании [Hicks T.G., Wierwille W.W., 1979] авторы моделировали психическую нагрузку водителей при выполнении задач на имитаторе. В эксперименте приняли участие студенты колледжа. Связь показателей ВСП с психической нагрузкой отсутствовала. Авторы объяснили это в частности тем, что во многом ситуация воспринималась участниками как игровая. Например, при возникновении преграды на дороге, участник мог выбрать проезд по такому узкому маршруту, который бы он не выбрал в реальной

ситуации. Р.А. Casper и его коллеги [1988] также предположили, что отсутствие в их исследовании чувствительности показателей ВСП к различным уровням сложности задач на распределение внимания может быть связано с низкой мотивацией обследуемых: студенты получали денежную компенсацию за участие в эксперименте, при этом эффективность выполнения не контролировалась, обратная связь отсутствовала.

Таким образом, проблема мотивации является чрезвычайно важной для объективной оценки воздействия психической нагрузки на функциональное состояние человека [Боднар Э.Л. и др., 1999; Данилова Н.Н., 1985]. Необходимо контролировать значимость решения предъявляемых индивидам задач в рамках эксперимента и реально оценивать, насколько различные формы вознаграждения (как правило, это фиксированная денежная плата) могут эффективно повлиять на мотивацию испытуемых. Так S. Miyake и его коллеги [1997] пришли к выводу, что во многих исследованиях психической нагрузки с помощью вегетативных показателей у обследуемых отсутствовала должная мотивация, которая бывает у человека-оператора в реальных условиях. Очевидно, что в этом случае низкая мотивация может привести к значительному искажению полученных результатов, особенно при моделировании ситуаций, когда от индивидов требуются значительные волевые усилия: монотонная деятельность с длительным выполнением однообразных заданий, либо высокая информационная нагрузка на психические процессы [Стрюков Г.А. и др., 1989; Tulga M.K., Sheridan T.B., 1980].

Противоречия в результатах чувствительности показателей ВСП могут быть вызваны уровнем сложности предъявляемых задач. Н.Н. Данилова [1985] определила фактор сложности задания как наиболее важный регулятор функционального состояния. Ряд исследователей предположили, что показатели ВСП не чувствительны к умеренному возрастанию трудности задачи, и скорее различают, например, переход от выполнения единственной задачи к двойной (от простого сценария – к сложному) [Jorna P.G.A.M., 1992; Paas F.G. et al., 1994; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1993]. Так, в исследованиях [Fournier L.R. et

al., 1999; Prinzl L.J. 3rd. et al., 2003; Svensson E. et al., 1997] показатели ВСР различали только минимальный и максимальный уровни сложности задач при выполнении полетов на тренажере.

Один из факторов, который может оказывать влияние на оценку психической нагрузки показателями ВСР, является речь [Cherri C. et al., 2004; Reilly K.J., Moore C.A., 2003]. В своей статье R.P. Sloan и его коллеги [1991] специально проанализировали влияние речи на оценки ВСР при выполнении арифметического теста вслух и про себя. Результаты экспериментов показали, что хотя обе формы теста вызвали сходное повышение ЧСС, снижение мощности спектра в дыхательном диапазоне (HF) было зафиксировано только в условиях отсутствия речи. Авторы сделали вывод, что речевые ответы во время теста значимо влияют на ВСР и затрудняют оценку механизмов, ответственных за изменение ВСР. В исследовании [Bernardi L. et al., 2000] у 12 добровольцев специально изучались эффекты свободного разговора, чтения про себя и вслух, спонтанного и контролируемого дыхания, а также арифметического теста (выполненного вслух и про себя) на ВСР. Чтение вслух, свободная беседа и арифметический тест (выполнение вслух) сдвигали дыхательную частоту в LF-диапазон, что увеличивало долю LF компонента в общей мощности спектра сердечного ритма и снижало долю HF компонента (на фоне снижения длительность R-R интервалов и незначительных изменений в общей ВСР). Авторы сделали вывод, что вербальная активность значимо воздействует на компоненты ВСР через изменение в дыхательной частоте.

Движения в процессе регистрации также могут влиять на оценку уровня психической нагрузки показателями ВСР [Cherri C. et al., 2004; Inomata O., 1977; Kalsbeek J.W.H., Sykes R.N., 1967; Luczak H., 1979]. Например, в работе [Fortrat J.O. et al., 1999] была проанализирована роль спонтанных движений на показатели ВСР. Сердечный ритм регистрировался в трех состояниях: (1) сидя, движения запрещены, (2) сидя, движения разрешены, (3) можно двигаться и вставать. Результаты показали, что ЧСС не зависела от условий эксперимента. Спонтанные движения (условия 2 и 3) вызвали рост ВСР в два и более раз. Во

время вставания возрос процент фрактального шума (на 71%). Авторы сделали вывод, что спонтанные движения способны значительно изменить как линейные, так и нелинейные показатели ВСП и требуют контроля при проведении исследований. Согласно результатам исследования [Porges S.W. et al., 2007], слабое повышение в моторной активности (например, движение руками при заполнении тестовых бланков на внимание) не влияло на ДСА и ЧСС дошкольников.

Противоречия в данных могут быть вызваны отсутствием строгого контроля таких переменных, важных при оценке показателей ВСП, как возраст и пол [Reilly K.J., Moore C.A., 2003; Tsuji H. et al., 1996]. Серия исследований была посвящена возрастным изменениям в ВСП. В многочисленных работах было установлено снижение показателей ВСП с возрастом у здоровых обследуемых [Коркушко О.В. и др., 1991; Писарук А.В., 2000; De Meersman R.E., 1993; Hellman J.B., Stacy R.W., 1976; Liao D. et al., 1995; Lipsitz L.A. et al., 1990; Moser M. et al., 1998; O'Brien I.A. et al., 1986; Odemuyiwa O., 1995; Shannon D.C. et al., 1987; Stejskal P. et al., 1999; Vuksanović V., Gal V., 2005; Zhang J., 2007]. В исследовании [Butcher S.H., Stocker D., 1996] пожилые обследуемые продемонстрировали значимо более высокие показатели ЧСС и снижение показателей ВСП во время выполнения теста Струпа и более медленно восстановление показателей после его выполнения, чем группа молодых добровольцев, для которых было также характерно более высокое относительное возрастание ЧСС в начале теста. Использование методов нелинейной динамики позволило установить также снижение сложности динамики сердечного ритма с возрастом [Beckers F. et al., 2006; Kaplan D.T. et al., 1991; Otsuka K. et al., 1997; Pikkujamsa S.M. et al., 1999; Ryan S.M. et al., 1994; Vuksanović V., Gal V., 2005].

Анализ половых различий выявил более высокий уровень вагусной сердечной активности и сложности динамики сердечного ритма у женщин в сравнении с мужчинами [Pikkujamsa S.M. et al., 1999; Ryan S.M. et al., 1994; Sinnreich R. et al., 1998]. В исследовании [Rossy L.A., Thayer J.F., 1998] было установлено, что согласно временным и частотным показателям ВСП, женщины

демонстрируют более высокий вагусный контроль сердечного ритма, а мужчинам характерен более высокий симпатический контроль сердечного ритма в состоянии покоя и при выполнении различных функциональных проб. В работе [Stein P.K. et al., 1997] авторы сделали выводы, что показатели ВСП сопоставимы у мужчин и женщин пожилого возраста. Однако на показатели ВСП различным образом влияет возраст. У мужчин, для которых начальные уровни ВСП значимо более высокие, пожилой возраст связан с глобальной редукцией в ВСП, отражающей редукцию как в вагусной, так и в симпатической сердечной активности и потерю циркадной модуляции сердечного ритма. У женщин пожилой возраст связан главным образом со снижением кратковременных индексов ВСП, без значимых изменений в циркадной вариабельности сердечного ритма. В исследовании [Agelink M.W. et al., 2001] молодые и среднего возраста женщины показали значимое снижение LF мощности спектра и LF/HF отношения в сравнении с мужчинами соответствующего возраста, при этом не было обнаружено значимых различий между полами для мощности спектра в HF диапазоне. Женщины старше 55 лет имели более высокие значения сердечного ритма в состоянии покоя в сравнении с мужчинами. J. Zhang [2007] установил значимые гендерные различия в различных возрастных группах (10÷80 лет) для показателей HF, HF/(HF+LF), LF/HF и ЧСС. При этом отсутствовал эффект пола для значений SDNN и общей спектральной мощности сердечных сокращений. В работе [Sato N. et al., 2003] представлены результаты исследования гендерных различий в сердечно-сосудистой реактивности на различные типы компьютеризированных психических задач: проход с помощью "мыши" по маршруту на экране монитора, когда горизонтальная и/или вертикальная ось "мыши" были инвертированы; вычитание 17 из случайного числа из 4 цифр. ЭКГ записывалась до начала (исходное состояние), во время и после выполнения (период восстановления) задач. Согласно полученным данным, LF показатель повышался, а HF снижался значимо во время выполнения задач при сравнении с исходным состоянием и восстановлением. При этом сердечный ритм значимо возрастал только в ходе арифметической задачи. Гендерные различия носили характер



тенденций: снижение HF во время задач было ниже в группе мужчин, которые имели более низкие исходные уровни вагусной активности (нормированные значения HF - HF<sub>ну</sub>) в исходном состоянии.

Заметим, что существуют исследования, в которых не было установлено различий по полу для показателей вагусной сердечной активности [Hughes J.W., Stoney C.M., 2000]. В эксперименте [Ramaekers D. et al., 1998] были обнаружены различия между женщинами и мужчинами по всем показателям ВСП (более высокие значения у мужчин), за исключением HF и pNN50 (показатели вагусной сердечной активности). Авторы сделали вывод, что для женщин характерна более низкая симпатическая сердечная активность. Этот вывод подтверждается результатами других исследований. Так в эксперименте [Liao D. et al., 1995] приняло участие 1984 здоровых обследуемых. Сравнение спектральных показателей позволило установить значимо более высокие значения LF для мужчин, и отсутствие значимых различий между мужчинами и женщинами по показателю HF. В не менее обширном исследовании [Dietrich D.F. et al., 2006], в котором приняло участие 1742 обследуемых, женщины имели в сравнении с мужчинами лишь более низкие показатели LF мощности. В работе [Beckers F. et al., 2006] не было обнаружено ясных различий между мужчинами и женщинами в нелинейных индексах ВСП.

Отдельно остановимся на важности контроля при оценки низкочастотных колебаний сердечного ритма (ДСА) таких факторов как частота и глубина дыхания [Althaus M. et al., 1998; Bernardi L. et al., 2000; Brown T.E. et al., 1993; Poyhonen M. et al., 2004; Rottenberg J. et al., 2002; Veltman J.A., Gaillard A.W., 1996]. В работах [Grossman P., Kollai M., 1993; Saul J.P. et al., 1989] было установлено, что независимо от изменений в сердечном вагусном контроле, высокая частота дыханий и низкий дыхательный объем будут снижать уровни ДСА, при этом низкая частота дыханий и высокий дыхательный объем будут повышать уровни ДСА. Дыхание в норме ограничено диапазоном 0.20÷0.50 Гц. Согласно ряду исследований, замедление и углубление дыхания результируется не только в возрастании мощности в HF диапазоне, но и

мощности в LF диапазоне (в абсолютных единицах) [Brown T.E. et al., 1993; Patwardhan A.R. et al., 1995; Schipke J.D. et al., 1999]. В тоже время получены результаты, которые не подтверждают данный вывод. Например, в исследовании [Tripathi K.K. et al., 2003] значимое снижение общей мощности и мощности в LF диапазоне не являлись связанными с изменениями в динамике дыхания. Также не наблюдалось роста мощности в HF диапазоне, связанного с частотой дыхания. В исследовании [Bloomfield D.M. et al., 2001] индивиды должны были дышать под заданный ритм с частотой 6, 9, 10, 12, 14, 16, 18, и 20 дыханий в минуту. Авторы обнаружили лишь небольшие различия в значениях HF, которые были статистически не значимы (слабый тренд снижения HF при повышении частоты дыханий). Сопоставляя результаты своего исследования с результатами других экспериментов, авторы делают вывод, что внутри нормального диапазона частоты дыханий (9÷20 дыхательных циклов в минуту), эффект ее на значения показателя HF незначителен. Это доказывает, что в таких условиях коррекция мощности спектра в HF диапазоне для частоты дыханий не требуется. Подводя итог обзору вопросов, связанных с влиянием дыхания на показатели ДСА, J.H. Noutveen с соавторами [2002] приходят к выводу, что на практике нескорректированные по эффектам дыхания (частота, глубина, парциальное давление углекислого газа в артериальной крови) внутрисубъектные изменения в ДСА допустимы в качестве индекса внутрисубъектных изменений в тонической вагусной модуляции сердечного ритма для большинства исследований воздействий психической нагрузки.

Другим фактором, который многие исследователи упускают из виду, является гетерогенность (неоднородность) индивидов относительно анализируемых показателей ВСП как в состоянии покоя, так и в процессе воздействия психических нагрузок, на которую указывают результаты исследований [Hancock P.A. et al., 1985; Kamarck T.W., Lovallo W.R., 2003; Lovallo W.R., Gerin W., 2003; Meshkati N. et al., 1989, 1995; Vuksanović V., Gal V., 2007]. Ряд авторов, отталкиваясь от результатов своих экспериментов, подчеркивают важность учета индивидуальных паттернов изменения показателей ВНС (вклю-

чая ВСР) при исследовании влияния психических нагрузок [Булатецкий С.В., Бяловский Ю.Ю., 2001; Miyake S., 1997; Mulder G., Mulder-Hajonides van der Meulen W.R.E.H., 1973; Rompelman O., 1980; Stefikova H. et al., 1985; Ward R.D., Marsden P.H., 2000]<sup>9</sup>. Например, в работе [Cacioppo J.T. et al., 1994b] был зафиксирован негативный хронотропный эффект вагуса на работу сердца (рост ЧСС и снижение ДСА) при воздействии психологического стрессора (выполнение арифметического теста). В тоже время, у части обследуемых в ситуации теста был отмечен рост ДСА при незначительном росте ЧСС. В исследованиях [Данилова Н.Н., Астафьев С.В., 1999; Ларионова Е.Л., Викулов А.Д., 2005] выполнение различных типов арифметических задач позволило выделить два противоположных вегетативных паттерна реакций: снижение показателей ВСР и их рост. В исследовании [Данилова Н.Н. и др., 1994] было установлено, что спектральные показатели ВСР оставались неизменными в условиях психической нагрузки (арифметическая задачи), когда оценивались одновременно группа с высокой личностной тревожностью (по опроснику Спилбергера) и группа с низкой личностной тревожностью. Когда же при анализе был учтен эффект личностной тревожности, то оказалось, что для высоко-тревожных субъектов было характерно снижение мощности спектра сердечных колебаний (во всех частотных диапазонах), а для низко-тревожных – повышение мощности спектра (за счет LF-диапазона) при выполнении задачи. В исследовании [Ларионова Е.Л., Викулов А.Д., 2005] авторы установили, что при моделировании психической нагрузки арифметическим тестом у обследуемых наблюдаются два основных типа реакций сердечного ритма с противоположными изменениями показателей. Один тип реакции выражался в виде снижения ВСР: уменьшение SDNN, увеличение показателей АМо, ИН. Реакция второго типа заключалась в повышении ВСР: рост SDNN, уменьшение АМо, ИН. Такая разнонаправленная динамика показателей ВСР была обусловлена различным веге-

---

<sup>9</sup> На этот фактор также указывают ряд исследователей, проанализировавших противоречивость данных ВСР у лиц с различными формами нарушений эмоциональной регуляции [Gotlib I.H., Hammen C.L., 1992; Moser M. et al., 1998].

тативным тонусом обследуемых. Лица, характеризующиеся низкой энергетикой спектральных показателей, а также сниженной вариабельностью R-R интервалов и повышенным индексом напряжения в фоне, отвечали на умственную нагрузку гиперадаптивной реакцией и утомлением. Напротив, исследуемые, обладающие достаточным запасом функциональных резервов, низким индексом напряжения, высокими значениями CV и SDNN в покое, адекватно реагировали на нагрузку. В эксперименте [Mezzacappa E.S. et al., 2001] показатель RMSSD значительно снизился лишь у 74.1% обследуемых при выполнении кратковременного арифметического теста (1 мин) и у 67.7% - при более длительном арифметическом тесте (5 мин). Снижение RMSSD во время теста Струпа наблюдалось у 83.3% обследуемых. В исследовании [Healey J.A., Picard R.W., 2005] авторы отмечают индивидуальные различия реакций водителей на три уровня нагрузки при вождении. Согласно данным [Jahn G. et al., 2005] такие показатели ВСР для психического напряжения, как MF (или "0.1 Гц компонент"), подвержены высокой межиндивидуальной вариабельности. Роль индивидуальных различий при реагировании ВНС (показатели ВСР) на психические нагрузки была установлена в исследованиях [Хватова М.В. и др., 2002; Щербатых Ю.В., 2001; Allen M.T., Crowell M.D., 1989; Collet C. et al., 2003; Salomon K., 2005; Sloan R.P. et al., 1994; Vein A.M. et al., 2002]. Таким образом, вслед за исследователями [Cacioppo J.T. et al., 1994b; Miyake S., 1997] мы должны подчеркнуть исключительную важность анализа индивидуальных паттернов реакций ВНС на внешние воздействия.

И, наконец, отметим важность корректного использования математического аппарата статистического анализа при анализе динамики показателей ВСР в ходе психических нагрузок. Например, выполнение ряда параметрических статистических методов, таких как t-критерий Стьюдента, факторный анализ, предполагает, что каждый из исследуемых показателей подчиняется нормальному закону. К сожалению, распределение результатов наблюдений редко является нормальным, и в любом случае требует обоснования отнесения к параметрическому семейству [Орлов А.И., 2004]. В тоже время, в со-

временных публикациях зачастую отсутствуют упоминания о проверке требования нормальности распределения анализируемых показателей.

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 в следующей главе. Заметим, что вопросы гетерогенности индивидуальной динамики показателей ВСР при воздействии различных психических нагрузок стали одной из ключевых задач наших экспериментальных исследований.