

ГЛАВА 3.

РАЗРАБОТКА ФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

3.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОМЕРНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

При использовании методов анализа ВСП исследователям приходится иметь дело с исходными данными высокой размерности, когда число регистрируемых показателей может достигать несколько десятков (например, разработанная нами программа MABP.DBase-HRV рассчитывает более 100 различных показателей ВСП). В подобных ситуациях легко объяснимо желание исследователей существенно снизить размерность анализируемого пространства признаков, перейти от исходного набора показателей к небольшому числу переменных, которые либо отбираются из числа исходных, либо строятся по определенному правилу по совокупности исходных показателей. Впоследствии эти переменные позволяют исследователям достаточно точно воспроизвести интересующие их свойства анализируемого массива данных [Айвазян С.А. и др., 1989]. Многомерный статистический анализ, включающий в себя такие методы как анализ главных компонент, факторный анализ, дискриминантный анализ, используется для снижения размерности анализируемого пространства признаков, отбора наиболее информативных показателей и классификации объектов. В справочном издании по классификации и снижению размерности [Айвазян С.А. и др., 1989] авторы определили три основных типа принципиальных предпосылок, обуславливающих возможность перехода от большого числа исходных показателей состояния анализируемой системы к существенно меньшему числу наиболее информативных переменных:

1. Дублирование информации, доставляемой сильно взаимосвязанными показателями;
2. Неинформативность показателей, мало меняющихся при переходе от одного объекта к другому (малая "вариабельность" признаков);
3. Возможность агрегирования (простого или "взвешенного" суммирования), по некоторым признакам.

В настоящее время исследователи все более приходят к пониманию того факта, что для изучения сложной динамики вегетативной нервной системы при различных эмоциональных состояниях требуется многофакторный анализ вегетативных реакций на внешние стимулы [Christie I.C., Friedman B.H., 2004]. Использование многофакторных техник может позволить более надежно различать паттерны активности вегетативной нервной системы во время воздействия различных психических нагрузок. В исследованиях, в которых для описания объектов используется пространство показателей ВСП, можно найти примеры применения методов многомерного статистического анализа. Например, в статье [Lee D.H., Park K.S., 1990] представлены результаты многомерного регрессионного анализа оценок показателей ВСП при воздействии психического и физического компонентов рабочей нагрузки. Авторы пришли к выводу, что возрастание психической нагрузки снижало синусовую аритмию, но не увеличивало значимо ЧСС. Возрастание физической нагрузки, в свою очередь, снижало синусовую аритмию и значимо увеличивало ЧСС. В исследовании [Colosimo A. et al., 1997] авторы использовали анализ главных компонент для определения наиболее важных факторов вариабельности и кластерный анализ для оценки сердечного возраста методами ВСП (TP, VLF, LV, HF, LF/HF) в покое и во время титл-теста. Анализ главных компонент позволил им выделить первый фактор (свыше 50% общей дисперсии переменных), который объединил следующие показатели: TP, VLF, LF и HF. В работе [Сорокин О.В. и др., 2004] представлены результаты факторного анализа 13 временных и частотных показателей ВСП для оценки вегетативной регуляции сердечного ритма у детей. Полу-

ченные факторы они связали с влиянием надсегментарных (эрготропных) и сегментарных (трофотропных) структур.

Анализ главных компонент для 11 показателей ВСП был выполнен в исследовании [Hayano J. et al., 1991] при фармакологическом воздействии на сердечный вагусный тонус у 15 здоровых обследуемых в положении лежа (покой). Авторы получили высокую корреляцию с вагусным тонусом ($r = 0.81 \div 0.92$) показателей SDNN, CV, RMSSD и трех индексов HF (рассчитанных параметрическим и непараметрическим методами спектрального анализа). Они составили первый главный компонент. При этом абсолютные значения частотной области для 3 индексов LF коррелировали менее выражено с вагусным тонусом ($r = 0.55 \div 0.70$), и были отнесены авторами ко второму главному компоненту. В работе [Miyake S., 2001] анализ главных компонент был использован для интеграции различных физиологических параметров (включая показатели ВСП, амплитуды плетизмограммы пальца и потоотделения) и субъективных оценок сложности задач в многомерный индекс оценки рабочей нагрузки. В исследовании [Nyklisek I. et al., 1997] с помощью 12 музыкальных отрывков специально моделировались 4 эмоции: счастье, спокойствие, печаль и возбуждение. Регистрировались показатели сердечного ритма (вагусная активность) и дыхания. Использование многомерного анализа физиологических показателей позволила авторам значимо классифицировать эмоциональные категории и сделать ясный вывод об их физиологической дифференцированности.

В экспериментах, выполненных под руководством R.W. Backs, активно использовались методы многомерного статистического анализа для оценки динамики сердечных показателей при воздействии психических нагрузок [Backs R.W., 1995; Backs R.W. et al., 1997; Backs R.W., Lenneman J.K., 1997]. Например, в исследовании [Backs R.W. et al., 1994] психическая нагрузка моделировалась задачами оперативного слежения с различным уровнем сложности. Анализ главных компонент позволил выделить пять факторов, три из которых – физиологические, два – субъективные оценки сложности задач. Требования центральной обработки сенсорной информации (процессы восприятия) во вре-

мя выполнения задач были связаны с фактором, определенным как симпатический контроль работы сердца. При этом физические требования задач отражались в факторе парасимпатического контроля регуляции сердечного ритма. В другом эксперименте [Backs R.W., Seljos K.A., 1994] моделировалась нагрузка на кратковременную память. Авторы выделили следующие главные компоненты: метаболический, два дыхательных, два сердечно-сосудистых и три, относящихся к выполнению деятельности и субъективным оценкам. В статье [Backs R.W., 1998] автор специально сравнил альтернативные методы вращений главных компонент при использовании факторного анализа для выделения факторов регуляции сердечного ритма. Он обнаружил наибольшую валидность Varimax-метода вращения главных компонент для выделения факторов симпатической и парасимпатической активности сердечного ритма.

Серия экспериментов для определения факторной структуры вегетативной регуляции сердечного ритма была выполнена под руководством J.J.V. Allen [Allen J.J.V. et al., 2001; Allen J.J.V., 2002; Allen J.J.V. et al., 2007]. В первоначальный корреляционный анализ были включены показатели: М, ЧСС, SDNN, рNN50, MSD, ДСА (рассчитывалась методом адаптивного полиномиального фильтра), CSI и CVI. Последние два индекса являются производными от показателей графика Пуанкаре: $CSI = L/T$ - сердечный симпатический индекс, $CVI = \log_{10}(L \times T)$ - сердечный вагусный индекс [Toichi M. et al., 1997]. Измерения производились в условиях исходного покоя и при выполнении серий арифметических операций. Между показателями была обнаружена очень высокая корреляция. В факторный анализ не были включены показатели М и ЧСС. Факторная структура оказалась высоко устойчивая к условиям регистрации и включала в себя два основных фактора. Первый фактор имел высокие нагрузки на все переменные, исключая индекс CSI, с которым был тесно связан второй фактор.

Более подробно остановимся на предложенной группой исследователей Университета штата Огайо во главе с G.G. Berntson и J.T. Casioippo модели вегетативного двумерного пространства для регуляции сердечного ритма [Berntson G.G. et al., 1991, 1993a, 1994b], согласно которой, отношения между двумя

отделами ВНС (СНС и ПНС) не сводятся исключительно к реципрокным. Авторы отталкивались в своих работах от результатов исследования К. Koizumi и М. Kollai [1981], которые продемонстрировали, что гипоталамус может организовывать как реципрокные, так и нереципрокные паттерны активности в двух вегетативных отделах в ответ на различные афферентные стимулы¹³. G.G. Berntson и J.T. Cacioppo представили регуляцию сердечного ритма как функцию двух независимых переменных (факторов): активности симпатической и парасимпатической систем, воздействующих на пейсмекерные клетки синусового узла. Они предположили, что вегетативный контроль органов, иннервированных СНС и ПНС, не может быть адекватно рассмотрен как континуум, простирающийся от ПНС к СНС области. Скорее всего, двухмерное вегетативное пространство, ограниченное осями СНС и ПНС, является минимальным отображением многоуровневых разнообразных моделей вегетативного контроля. Для оценки вагусной активности авторы предложили использовать показатель ДСА, а для симпатической – длительность периода предизгнания желудочков сердца (pre-ejection period - PEP) [Cacioppo J.T. et al., 1994a]. Экспериментально они доказали, что изменения активности СНС и ПНС в условиях психической нагрузки (арифметический тест, речевое сообщение) независимы, и для объяснения реактивности сердечного ритма необходимо использовать двухфакторную модель [Cacioppo J.T. et al., 1994a, 1994b, 1995].

В своей статье R.W. Basks [1995] приводит результаты исследования психической рабочей нагрузки пилотов на основе модели вегетативного двумерного пространства (лабораторные условия). Представленные им результаты дока-

¹³ Заметим, что еще Э. Гелльгорн [1948] показал, что возникновение эмоций может приводить к одновременному возбуждению и симпатического и парасимпатического отделов ВНС, и синергизм между этими отделами имеет место чаще, чем реципрокные отношения. П.В. Симонов [1981] использовал выводы Э. Гелльгорна и результаты других экспериментальных исследований для описания сложной динамики активации симпатического и парасимпатического отделов ВНС по мере роста положительного и отрицательного эмоционального напряжения, которым характеризуются 16 базальных эмоциональных состояний.

зывают, что использование данного подхода обеспечивает возрастание точности для оценки психической нагрузки. Так было установлено, что все три задачи, включенные в эксперимент: на рабочую память, распределение внимания и отслеживание изменений в параметрах, вызывают рост сердечного ритма. При этом первая задача характеризовалась реципрокным взаимодействием активности СНС и торможения ПНС (центральные процессы и процессы восприятия и моторики), вторая задача – несвязанной активностью СНС (центральные процессы), третья задача – несвязанным торможением ПНС (процессы восприятия и моторики). Автор предположил, что несвязанная активность СНС вызывается центральными процессами, несвязанное торможение ПНС – процессами восприятия и моторики, а реципрокное взаимодействие активности СНС и торможения ПНС – комбинацией центральных процессов и процессов восприятия и моторики.

Таблица 8.

Восемь режимов вегетативной регуляции сердечного ритма, согласно [Lenneman J.K., Backs R.W., 2003].

Симпатическая активность	Парасимпатическая активность		
	<i>Возбуждение</i>	<i>Не изменяется</i>	<i>Торможение</i>
<i>Возбуждение</i>	Коактивация	Несвязанное возбуждение СНС	Реципрокные изменения
<i>Не изменяется</i>	Несвязанное возбуждение ПНС	Отсутствие изменений	Несвязанное торможение ПНС
<i>Торможение</i>	Реципрокные изменения	Несвязанное торможение СНС	Взаимное торможение

В статьях [Backs R.W. et al., 1995, 1997; Backs R.W., Lenneman J.K., 1997; Lenneman J.K. et al., 1998; Backs R.W. et al., 2003] обосновывается эффективность использования модели вегетативного двумерного пространства для оценки психической рабочей нагрузки как в лабораторных исследованиях, так и при

выполнении пилотами и водителями заданий на тренажере и в реальных условиях. R.W. Backs назвал это декодированием соответствий между психологическими и физиологическими процессами (*psychological-physiological mappings*) [2001]. Используя модель вегетативного двумерного пространства, J.K. Lennehan и R.W. Backs [2003] описали 8 возможных режимов вегетативной регуляции сердечного ритма (см. табл. 8). Заметим, что ситуация, при которой активность СНС и ПНС не изменяются ими не рассматривается в качестве режима вегетативной регуляции сердечного ритма.

Отталкиваясь от модели вегетативного двумерного пространства и развивая принцип векторного кодирования в психофизиологии, предложенного Е.Н. Соколовым [1995], Н.Н. Данилова использовала в своих исследованиях трехмерное векторное пространство для описания динамики сердечного ритма при воздействии различных видов психической нагрузки. Первый фактор этой модели (VLF) отражает метаболические, второй (LF) – сосудистые и третий (HF) дыхательные процессы, влияющие на регуляцию сердечного ритма. В эксперименте [Данилова Н.Н., 1995] ею были выделены два типа вегетативных реакций на психическую нагрузку. При решении арифметических задач (умножение двузначных чисел) преобладали реакции уменьшения сосудистой и дыхательной модуляции сердечного ритма (LF и HF). В опытах на ассоциативное обучение (запоминание искусственных названий цветов) наблюдалось увеличение сосудистой и дыхательной модуляции сердечного ритма. Первый тип реакций Н.Н. Данилова связала с состояниями напряжения и высокой индивидуальной личностной тревожностью. Совместное усиление дыхательных и сосудистых модуляций в опытах на ассоциативное обучение обусловлено, по мысли автора, ориентировочным рефлексом, при котором совместно активизируются обе ветви ВНС (с преобладанием вагусных влияний). С этих позиций подавление дыхательных и сосудистых модулирующих влияний можно рассматривать как усиление оборонительного рефлекса. В следующем эксперименте [Данилова Н.Н., Астафьев С.В., 1999] для оценки воздействия психической нагрузки (различные типы арифметических действий), наряду со спектральными показате-

лями использовались индексы временной области. Вновь были установлены два типа реакций сердечного ритма на информационную нагрузку: (1) снижение ЧСС, ИН, рост SDNN, HF и LF (сердечно-сосудистый компонент ориентировочного рефлекса); (2) рост ЧСС, ИН и снижение SDNN, HF, LF (сердечно-сосудистый компонент оборонительного рефлекса).

В статье [Friedman В.Н., Santucci А.К., 2003] представлено исследование сердечно-сосудистой реактивности индивидов на основе идиодинамической парадигмы (С. Розенцвейг). Паттерны вегетативной сердечно-сосудистой регуляции (включая М, HF, PEP и другие показатели работы сердца) оценивались у субъектов при выполнении различных психических задач и функциональных проб. Индивидуальные сердечно-сосудистые профили были выделены из полученных данных с помощью R-техники факторного анализа. Были выделены три главных фактора: фактор сердечного ритма, сократимости сердца и периферического сопротивления сосудов. Авторы сделали вывод, что индивидуальный подход может расширить наши представления на сердечно-сосудистую реактивность.

В исследовании [Allen М.Т. et al., 1991] регистрация физиологических показателей сердечно-сосудистой деятельности (ЧСС, ударный сердечный объем, PEP, артериальное давление, общее периферическое сопротивление и ДСА) производилась во время психических нагрузок (тест на время реакции и арифметический тест) и функциональной пробы (холодовой прессорный тест). Для выделения индивидуальных паттернов вегетативных реакций на задачи был использован кластерный анализ по результатам каждой задачи (метод Ward). Кластерный анализ позволил авторам определить 4 кластера паттернов вегетативных реакций для теста на время реакции и арифметического теста, и 5 кластеров паттернов вегетативных реакций для холодого прессорного теста. А. Beda с коллегами [2004] применили алгоритм кластеризации k-средними и иерархический кластерный анализ для определения индивидуальных паттернов реакций 14 физиологических показателей (включая ЧСС и HF) на психологическую нагрузку – тест Струпа, получив, в итоге, 5 кластеров.

В целом, использование методов многомерного статистического анализа в исследованиях variability сердечного ритма достаточно ограничено. И если мы вернемся к обзору основных направлений анализа ВСР в психологических исследованиях (см. главу 1.2), то обнаружим, что во многих работах авторы имплицитно прибегают к снижению размерности анализируемого пространства признаков через произвольный выбор показателей ВСР для своих целей. Зачастую такой выбор не имеет четких обоснований и носит отпечаток субъективизма.

В своей практике применения методов анализа ВСР для целей профессионального отбора операторов АЭС мы также столкнулись с проблемой выбора наиболее информативных показателей из многочисленного пространства признаков. Для решения ее мы воспользовались процедурой факторного анализа [Машин В.А., Машина М.Н., 2004], результаты которого представлены в следующем параграфе.

3.2. ТРЕХФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ВАРИАбельНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И КЛАССИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

Исходные данные для проведения факторного анализа были получены на референтной группе (RG), которую составили 848 здоровых обследуемых (средний возраст = 29.84 лет, SD = 6.54 лет). Регистрация сердечного ритма производилась в положении сидя в утренние часы (продолжительность регистрации 10 мин). Для факторного анализа были отобраны средние значения показателей ВСР по каждому обследуемому (N=848). Также в исследовании были использованы полученные ранее массивы R-R интервалов по 4 группам операторов с различными функциональными состояниями (см. главу 2.3): ФС1 – Норма, ФС2 – Психическое напряжение, ФС3 – Эмоциональное возбуждение, ФС4 – Психическое утомление.

Для проведения факторного анализа были включены следующие показатели временной области: M (средний R-R интервал), SDNN (среднее квадрати-

ческое отклонение R-R интервалов), RMSSD (квадратный корень из среднего значения квадратов разностей величин последовательных R-R интервалов), pNN50 (доля последовательных R-R интервалов, различие между которыми превышает 50 мс), CV (коэффициент вариации R-R интервалов), Mo (мода - наиболее часто встречающееся значение R-R интервалов), AMo (амплитуда моды - доля R-R интервалов анализируемого временного ряда, соответствующих значению моды), MxDMn (вариационный размах - разность между длительностью наибольшего и наименьшего R-R интервала). Частотная область анализа ВСР была представлена показателями: мощность спектральной плотности (в мсек²) в высокочастотном (HF, 0.15-0.4 Гц), низкочастотном (LF, 0.04-0.15 Гц) и очень низкочастотном (VLF, ≤ 0.04 Гц) диапазонах, а также общая мощность спектральной плотности (TP). Из показателей графа сердечного ритма в факторный анализ были включены: ND (число узлов графа), NRib (число ребер графа), b_1 (тангенс угла наклона линии регрессии графа), LSY (средняя сумма квадратов отклонений узлов графа от линии регрессии, вдоль поперечной оси эллипса Y), LSX (средняя сумма квадратов отклонений узлов вдоль продольной оси эллипса X от линии, проведенной перпендикулярно линии регрессии графа) и отношение LSY/LSX. Дополнительно рассчитывался показатель CC_1 (значение первого коэффициента автокорреляционной функции анализируемого временного ряда).

Выполнение факторного анализа требует, чтобы распределение каждого анализируемого количественного признака подчинялось нормальному закону [Ким Д.О. и др., 1989]. Для проверки гипотезы о нормальности распределения показателей ВСР мы воспользовались критериями Шапиро-Уилка и Колмогорова-Смирнова (с поправкой Лиллиефорса). Предварительно распределения показателей ВСР были преобразованы к нормальному виду. Согласно полученным уровням значимости критерия Шапиро-Уилка (см. табл. 9), мы можем принять гипотезу о нормальности распределения преобразованных показателей ВСР ($p > 0.05$). Лишь для показателя pNN50 эта гипотеза была отвергнута ($p < 0.01$). По этой причине он был исключен из факторного анализа. Выводы о

нормальности распределения преобразованных показателей ВСП были подтверждены и критерием Колмогорова-Смирнова: для всех показателей, которые были включены в факторный анализ, $p > 0.20$ и лишь для LSY $p < 0.10$.

Таблица 9.

Факторные нагрузки на показатели ВСП (специально выделены нагрузки выше 0.70), распределения которых преобразованы к нормальному виду, а также уровень значимости (p) критерия нормальности распределения Шапиро-Уилка [Машин В.А., Машина М.Н., 2004]

Показатели ВСП	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	p
ln(SDNN+6)	0.991	0.070	0.093	0.611
ln(CV)	0.952	-0.134	-0.266	0.417
ln(MxDMn+100)	0.926	0.174	0.112	0.818
ln(AMo+20)	-0.949	-0.114	-0.066	0.282
1/ln(RMSSD+20)	-0.777	-0.609	-0.149	0.166
ln(TP+104)	0.991	0.053	0.102	0.739
1/ln(VLF+126)	-0.859	0.272	-0.223	0.587
ln(LF+28)	0.916	-0.074	0.023	0.938
ln(HF+15)	0.746	0.630	-0.003	0.218
ln[1/(256-ND)-0.00365]	0.914	0.347	0.150	0.347
ln[1/(255-NRib)-0.00265]	0.815	0.494	0.204	0.140
ln(LSY+43)	0.819	0.553	0.141	0.066
ln(LSX+87)	0.964	-0.241	0.046	0.269
ln(RLS-0.012)	0.059	0.983	0.152	0.147
ln[1/(1-b ₁)-0.27]	-0.059	-0.985	-0.150	0.409
ln[1/(1-CC ₁)-0.14]	-0.058	-0.985	-0.150	0.158
ln(M)	0.318	0.471	0.819	0.911
ln(Mo-25)	0.318	0.446	0.833	0.658

В факторном анализе использовались коэффициенты корреляции Пирсона. Выделение факторов производилось методом главных компонент. С помощью критерия "каменистой осыпи" Кэттелла и критерия Кайзера [Иберла К., 1980] были отобраны 3 наиболее значимые фактора с суммарным накопленным вкладом в дисперсию признаков 96.37%. Для максимизации величин факторных нагрузок на показатели ВСР и облегчения содержательной интерпретации выделенных факторов, предварительно была выполнена процедура вращения факторов методом "Viquartimax raw".

Согласно полученным данным (см. табл. 9), первый фактор (доля общей дисперсии 59.3%) группирует показатели, которые имеют выраженную положительную связь с SDNN ($r = 0.799 \div 0.991$). Чтобы оценить, насколько значения первого фактора определяются переменной SDNN, построим регрессионную модель, в которой в качестве зависимой переменной выступают значения по первому фактору для референтной группы, а в качестве независимой переменной – значения показателя SDNN. Коэффициент R^2 , определяющий качество регрессионной модели, составил 0.983. Таким образом, 98.3% дисперсии ("поведения") первого фактора объясняются переменной SDNN. Данный фактор, для оценки которого используется показатель SDNN, можно интерпретировать как фактор общего тонуса вегетативной нервной системы [Степура О.Б. и др., 2001]. Заметим, что сходные результаты были получены в исследовании [Massin M.M. et al., 1999], в котором был выполнен корреляционный анализ для показателей временной и частотной области ВСР. Авторами была обнаружена значимая корреляция показателей друг с другом, включая SDNN, RMSSD, pNN50, VLF, LF, HF и LF/HF. При анализе временных и частотных показателей ВСР в работе [Kleiger R.E. et al., 1991] была также получена высокая взаимная корреляция переменных TP¹⁴, LF, HF, RMSSD, pNN50 ($r > 0.80$), а в исследовании [Colosimo A. et al., 1997] показателей TP, VLF, LF и HF.

¹⁴ Заметим, что показатель TP представляет собой суммарную мощность спектра (дисперсии) по частотным диапазонам, и фактически равен SDNN.

Третий фактор (доля общей дисперсии 9.4%) имел высокую положительную нагрузку с показателями M и M_0 (коэффициент корреляции между ними $r = 0.995$). Согласно точке зрения, выраженной в работах [Coumel P. et al., 1995; Goldberger J.J., 1999; Murakawa Y. et al., 1993], данный фактор отражает баланс между активностью симпатического и парасимпатического отделов ВНС в регулировании сердечного ритма. Для оценки этого фактора был использован показатель M , так как он обладает лучшими статистическими свойствами (форма распределения показателя M ближе к нормальному Гауссовому распределению).

Второй фактор (доля общей дисперсии 27.6%) сгруппировал такие показатели как b_1 , CC_1 и RLS (выраженная взаимная корреляция $r > 0.999$). Коэффициент R^2 , определяющий качество регрессионной модели для второго фактора и показателя b_1 , был равен 0.969. Таким образом, 96.9% дисперсии второго фактора объясняются переменной b_1 .

Ранее нами было показано (см. главу 2.4), что показатель тангенса угла наклона линии регрессии графа сердечного ритма (b_1) отражает как линейные (периодические колебания), так и нелинейные процессы (стохастический шум) в динамике ритма сердца на коротких стационарных отрезках. При этом два основных параметра влияют на значения b_1 – это период колебаний сердечного ритма и относительный уровень шума в динамике ритма сердца. Возрастание периода колебаний характерно для активности надсегментарных (корково-лимбических) структур головного мозга в регуляции сердечного ритма и отражается в росте показателя b_1 . Снижение периода колебаний характерно для активности сегментарных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма и отражается в уменьшении показателя b_1 . Повышение относительного уровня шума наблюдается при росте вагусной сердечной активности и вызывает снижение значений показателя b_1 . Подробнее остановимся на современных представлениях об интегративной роли надсегментарных структур головного мозга в регулировании сердечного ритма, психических, соматических и других вегетативных функций.

Вторая половина XX века охарактеризовалась ростом интереса исследователей к отношениям между кортикальными и сердечно-сосудистыми процессами [Koers G., 1997; van der Veen F.M., 1997]. В исследованиях [Cechetto D.F., Saper C.B., 1990; Mesulam M.M., Mufson E.J., 1982; Neafsey N.E., 1990] была установлена важная роль ряда кортикальных областей в регулировании сердечно-сосудистой деятельности, включая переднюю цингулярную кору головного мозга (anterior cingulate cortex - ACC), кору островка (insular cortex) и орбитофронтальную кору (orbitofrontal cortex). Например, различные исследования продемонстрировали, что передняя цингулярная кора имеет эфферентные связи с ядром солитарного тракта, латеральной гипоталамической областью, парабрахияльным ядром, двойным ядром и вагусным дорсальным двигательным ядром [Cechetto D.F., Saper C.B., 1990; Neafsey N.E., 1990; Powell D.A. et al., 1990]. Так было доказано, что при стимуляции ACC обычно сердечный ритм замедляется, а артериальное давление снижается [Cechetto D.F., Saper C.B., 1990; Neafsey N.E., 1990; Powell D.A. et al., 1990]. В исследовании [Powell D.A. et al., 1990] было также обнаружено, что ACC играет важную роль в опосредовании сердечно-сосудистых изменений у кроликов в течение ассоциативных обучающих задач. Н.Д. Critchley с коллегами [2005] установил связь между активностью определенных структур головного мозга (миндалины, коры островка, ACC и ствола мозга), вызванной эмоциональными лицевыми зрительными стимулами, и изменениями сердечного ритма у человека.

Результаты экспериментальных исследований позволили J.E. Skinner [1985] создать модель управления лобной корой сердечно-сосудистой деятельностью при воздействии стрессоров, которая включала следующие надсегментарные структуры (см. Приложение 8): таламическое ретикулярное ядро, мезэнцефальная ретикулярная формация, гиппокамп, гипоталамус, миндалина. Через них активность лобной коры головного мозга передается на сегментарный уровень регуляции сердечной деятельности: ядро солитарного тракта, двойное ядро и вагусное дорсальное двигательное ядро (модулирование парасимпатической активности), роstralная вентролатеральная часть продолгова-

того мозга (модулирование симпатической активности). Ядро солитарного тракта получает информацию от сердца и системы кровообращения (барорецепторов), играя важную роль в регулировании артериального давления.

Связь кортикальных структур с регуляцией сердечного ритма нашла отражение и в концепции М. Познера о трех системах внимания [Posner M.I., 1994; Posner M.I., Raichle M.E., 1994]: ориентирующей (orienting), мобилизующей (alerting) и исполнительной (executive). В функциональную нервную систему, обеспечивающую alertность (готовность к деятельности), включены, согласно М. Познера, структуры, связанные как с произвольным удержанием объекта в поле внимания (лобные отделы правого полушария – мотивационная составляющая деятельности), так и с регуляцией уровня возбудимости коры (ядра ствола головного мозга – уровень активации). При этом голубое пятно понимается как центральная структура головного мозга, которая опосредует отношения префронтальной области головного мозга с подкорковыми вегетативными центрами продолговатого мозга (см. Приложение 9). Через опорное ядро терминального тяжа голубое ядро связано с двойным ядром (модуляция парасимпатической сердечной активности), а через латеральную гипоталамическую область – с ростральной вентролатеральной частью продолговатого мозга (модуляция симпатической сердечной активности). Передняя цингулярная кора головного мозга рассматривается М. Познером как важнейшая нервная структура исполнительной системы внимания (см. Приложение 9). Передняя цингулярная кора напрямую связана с ядром солитарного тракта, двойным ядром и вагусным дорсальным двигательным ядром (модуляция парасимпатической сердечной активности), а через латеральную гипоталамическую область с ростральной вентролатеральной частью продолговатого мозга (модуляция симпатической сердечной активности).

Многочисленные исследования подтвердили важную роль повышенной активности в префронтальной области головного мозга для достижения гибкого ответа на изменяющееся окружение, на воздействие психической нагрузки [Bar-Haim Y. et al., 2004; Compte A. et al., 2000; Goldman-Rakic P.S., 1998; Miller

Е.К., 2000]. Также эта область головного мозга вовлечена в процессы торможения (модулирования парасимпатической активности), которые являются решающими для выполнения психических задач и регуляции поведения и эмоций [Davidson R.J., 2002; Drevets W.C., 1999; Hariri A.R. et al., 2000]. Были определены различные пути, по которым лобная кора модулирует парасимпатическую активность через подкорковые структуры [Ter Horst G.J., Postema F., 1997; Ter Horst G.J., 1999]. Рядом ученых была выдвинута гипотеза о тормозящих корково-подкорковых контурах (inhibitory cortical-subcortical circuits) [Benarroch E.E., 1993; Benarroch E.E., 1997; Masterman D.L., Cummings J.L., 1997; Mayberg H.S. et al., 1999; Spyer K.M., 1989], которые J.F. Thayer и R.D. Lane [2000] впервые связали с вариабельностью сердечного ритма. Вероятность нисходящих тормозных влияний экспериментально была установлена А.В. Вальдманом с коллегами [1988]. Ими было показано подавление как вазомоторного, так и кардиоохронотропного компонентов барорефлекса в случаях активации церебральных эрготропных систем.

Роль активности высших кортикальных нервных структур в регуляции сердечного ритма при различных функциональных состояниях подчеркивается многими исследователями вариабельности сердечного ритма [Мельников А.Х. и др., 2000; Berntson G.G., Cacioppo J.T., 2004; Lovallo W.R., Gerin W., 2003; Newell M.E., 2005; Richards J.E., Casey B.J., 1991]. Исследователи экспериментально установили ряд функциональных систем внутри ЦНС, которые обеспечивают целенаправленное поведение и адаптацию организма к новым условиям. К таким системам относится центральная вегетативная нервная сеть (central autonomic network – CAN) [Benarroch E.E., 1993, 1997]. Функционально эта сеть является интегральным компонентом внутренней регулирующей системы, через которую мозг управляет висцеромоторными, нейроэндокринными и поведенческими реакциями. На сегодняшний день выделены следующие структуры головного мозга, входящие в центральную вегетативную нервную сеть (ЦВНС): передняя часть поясной извилины, инсулярная, орбитофронтальная и вентромедиальная предлобные области коры головного мозга, центральное ядро мин-

далины, паравентрикулярные и связанные ядра гипоталамуса, серое вещество Сильвея водопровода, парабрахиальное ядро, ядро одиночного пути, двойное ядро, вентролатеральная, вентромедиальная и тегментальная области продолговатого мозга. Через проводящие пути симпатической и парасимпатической нервной системы ЦНС иннервирует сердце, получая обратную связь через сенсорную информацию от рецепторов внутренних органов. О. Devinsky с коллегами [1995] в качестве функциональной системы выделили переднюю управляющую область головного мозга (anterior executive region – AER), которая регулирует поведение через контроль и управление мотивационных свойств внешних и внутренних стимулов. Она была названа "ростральная (передняя) лимбическая система" ("rostral limbic system") и включает в себя переднюю, инсулярную и орбитофронтальную кору головного мозга, миндалину, серое вещество Сильвея водопровода, вентральный стриатум и вегетативные моторные ядра ствола мозга. Схожим образом A.R. Damasio [1998] определяет нервный "эмоциональный контур" ("emotion circuit"), который имеет значительное совпадение нервных структур с ЦНС и AER [Thayer J.F., Lane R.D., 2000].

J.F. Thayer и В.Н. Johnsen [2004] предположили, что "центральная вегетативная нервная система", "ростральная лимбическая система", "эмоциональный контур" и подобные функциональные системы [Masterman D.L., Cummings J.L., 1997; Spyer K.M., 1989] представляют собой общую центральную функциональную нервную сеть, которая по-разному определяется исследователями в своих работах. Она связана с обеспечением исполнительных, социальных и аффективных функций, с управлением психофизиологическими ресурсами внимания и эмоций [Friedman В.Н., Thayer J.F., 1998a, 1998b; Thayer J.F., Friedman В.Н., 1997]. Благодаря центральной функциональной нервной сети дополнительные нервные структуры гибко мобилизуются для управления активными формами поведения. Такой сложный, интегративный комплекс нервных структур предусматривает максимальную гибкость организма при быстрой подстройке к изменяющимся требованиям окружающей среды. Когда эта сеть ригидна, ее элементы жестко взаимосвязаны или связь между ними полностью от-

сутствует, способность мобилизации и использования соответствующих нервных структур в условиях высокой психической нагрузки крайне затруднена, и организм, таким образом, менее адаптивен. В модели нейровегетативного взаимодействия, предложенной J.F. Thayer и В.Н. Johnsen В.Н. [2004], активность комплекса нервных структур, включенных в когнитивную, аффективную и вегетативную регуляцию, детерминирует и когнитивно-аффективное поведение, и вариабельность сердечного ритма. Согласно J.F. Thayer и R.D. Lane [2000], показатели ВСР способны оценивать важные аспекты саморегуляции поведения благодаря возможности ВСР отражать механизмы обратной нервной связи взаимодействия центральной и вегетативной нервных систем.

Согласно нейрофизиологическим исследованиям, выполненных под руководством А.М. Вейна [2003], сегментарный уровень регуляции сердечно-сосудистой деятельности (включая симпатические и парасимпатические вегетативные центры продолговатого мозга) находится под контролем надсегментарных (корково-лимбических) нервных структур [Баевский Р.М. и др., 2001; Флейшман А.Н., 1999b], образуя, согласно терминологии J.F. Thayer и В.Н. Johnsen [2004], центральную функциональную нервную сеть. В состоянии глубокого покоя, расслабления, когда активность надсегментарных структур в регулировании сердечного ритма минимальна, а в вегетативном балансе преобладает вагусная сердечная активность (трофотропная деятельность), наблюдается значительный рост высокочастотных (дыхательных) колебаний в сердечном ритме и повышение нелинейной динамики (снижение показателя b_1) [Машин В.А., Машина М.Н., 2004; Машин В.А., 2006; Mashin V.A., 2006]. Например, в исследовании [Sakuragi S., Sugiyama Y., 2004] рост парасимпатической активности (мощности спектра сердечного ритма в HF диапазоне) сопровождался значимым снижением кортикальной активности (показателя альфа-десинхронизации головного мозга). В тоже время, состояния эмоционального возбуждения, для которых характерна активность надсегментарных нервных структур (эрготропная деятельность), сопровождаются ростом мощности спектра сердечных сокращений в VLF диапазоне [Машин В.А. и др., 1997; Машин

В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Хаспекова Н.Б., 1996; Хаспекова Н.Б., 2003; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000] и повышением показателя b_1 [Маши́н В.А., Машина М.Н., 2004; Маши́н В.А., 2006; Mashin V.A., 2006].

Как было отмечено выше, надсегментарные отделы головного мозга могут модулировать через подкорковые структуры не только парасимпатическую (эффект торможения), но и симпатическую сердечную активность (эффект возбуждения). Это объясняет, почему одни исследователи видят в VLF связь надсегментарных отделов головного мозга с активностью симпатического вегетативного отдела [Баевский Р.М. и др., 1984; Хаспекова Н.Б., 2003], а другие экспериментально обосновывают, что мощность спектра сердечного ритма в этом диапазоне зависит, главным образом, от парасимпатической активности. [Taylor J.A. et al., 1998]. Мы полагаем, что показатель VLF отражает активность надсегментарных структур головного мозга в управлении сердечного ритма, которая может выражаться во влиянии как на симпатические, так и парасимпатические сегментарные структуры ВНС. Это согласуется, например, с выводами J.E. Skinner [1985] и M.I. Posner [1994].

Таким образом, второй фактор, который оценивается показателем b_1 , отражает баланс между активностью надсегментарных (повышение значений b_1 за счет роста VLF компонента и снижения нелинейной динамики) и сегментарных (снижение значений b_1 за счет роста нелинейной динамики в сердечном ритме и уменьшения VLF компонента) структур головного мозга, участвующих в регуляции сердечного ритма. Заметим здесь, что первый фактор общего тонуса ВНС (оцениваемый показателем SDNN) отражает суммарную активность как надсегментарных, так и сегментарных структур головного мозга, участвующих в регуляции сердечного ритма.

Выделенная с помощью многомерного статистического анализа факторная структура представляет собой трехмерное пространство для описания процессов регулирования сердечного ритма (см. Приложение 10), и может рассматриваться как дальнейшее развитие идей Р.М. Баевского, А.Н. Флейшмана и Н.Б. Хаспековой [Баевский Р.М., 1968; Баевский Р.М., Берсенева А.П., 1997;

Флейшман А.Н., 1999а; Хаспекова Н.Б., 1996, 2003], а также G.G. Berntson и J.T. Cacioppo [Berntson G.G. et al., 1991, 1993а, 1994b]¹⁵. Но если модель двумерного пространства G.G. Berntson и J.T. Cacioppo ограничена описанием сегментарных влияний на регуляцию сердечного ритма (парасимпатических и симпатических вегетативных центров ствола головного мозга и спинного мозга), то в нашей модели мы, в след за Р.М. Баевским, А.Н. Флейшманом и Н.Б. Хаспековой, учитываем также активность надсегментарных (корково-лимбических) структур головного мозга. Данная модель ВСР предоставила нам возможность на следующем шаге провести классификацию функциональных состояний через их описание в трехмерном пространстве, используя значения факторных показателей: SDNN – фактор 1, b_1 – фактор 2, M – фактор 3.

Для построения классификации функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР, с помощью метода процентилей [Власов В.В., 1988] было выполнено нормирование главных факторов по данным референтной группы (RG): фактор 1 - SDNN_n, фактор 2 - b_{1n} , фактор 3 – M_n (см. табл. 10). Нормирование производилось по 9 диапазонам. Границы диапазонов (0.1, 2.3, 15.9, 30.9, 69.1, 84.1, 97.7 и 99.9%) соответствовали следующим значениям стандартного отклонения (SD) нормального распределения: -3, -2, -1, -0.5, +0.5, +1, +2, +3 [Гласс Дж., Стэнли Дж., 1976]. С помощью значений нормированных показателей было выделено 8 классов функциональных состояний (см. Табл. 11).

Рассмотрим первые четыре функциональных класса (ФК), для которых характерны высокие значения по фактору общего тонуса ВНС (SDNN_n)¹⁶.

¹⁵ На важность разработки многомерных теорий вегетативного контроля указывал в одной из своих работ S.W. Porges [1995b].

¹⁶ Для описания функциональных классов мы воспользовались данными психофизиологических обследований по референтной группе. Дополнительно мы использовали результаты медико-физиологической функциональной диагностики (гемодинамика, ЭКГ, велоэргометрия), которая проводилась параллельно с психофизиологическими обследованиями [Машин В.А. и др., 1997; Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000].

Таблица 10.

Границы диапазонов процентилей для нормирования показателей трехфакторной модели ВСР [Машин В.А., 2007b].

ФАКТОРЫ	Границы диапазонов процентилей							
	0.1%	2.3%	15.9%	30.9%	69.1%	84.1%	97.7%	99.9%
$\Phi_1(M)$	622	674	741	787	909	998	1153	1377
$\Phi_2(SDNN)$	10.9	18.7	30.6	37.7	55.0	66.8	96.7	147.1
$\Phi_3(b_1)$	-0.017	0.327	0.616	0.7201	0.845	0.886	0.934	0.961

Таблица 11.

Диагностика функциональных классов (ФК) операторов на основе нормированных показателей трехфакторной модели variability сердечного ритма [Машин В.А., 2007b].

Нормированные показатели	SDNN _n [5÷9]		SDNN _n [1÷4]	
	b _{1n} [1÷4]	b _{1n} [5÷9]	b _{1n} [5÷9]	b _{1n} [1÷4]
M _n [5÷9]	ФК1	ФК3	ФК6	ФК8
M _n [1÷4]	ФК2	ФК4	ФК5	ФК7

[ФК1] Функциональный класс "**Норма**" (SDNN_n 5÷9, b_{1n} 1÷4, M_n 5÷9, диапазон¹⁷ 1÷12) - обследуемые, отнесенные к этому классу, имеют также вы-

¹⁷ Отметим, что речь идет именно о *классах* функциональных состояний. В каждом функциональном классе мы имеем непрерывный континуум функциональных состояний в диапазоне, который задается минимальными и максимальными значениями нормированных показателей трехфакторной модели ВСР. Например, в первом функциональном классе мы можем выделить следующие функциональные состояния в диапазоне от 1 до 12: активный покой, рас-

сокие значения по второму фактору (преобладание активности сегментарного уровня регулирования сердечного ритма над корково-лимбическим – низкие значения b_1) и третьему (преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе – высокие значения M). Такие показатели характерны для состояний покоя, глубокого расслабления, сна, при условии сохранения функциональных резервов (трофотропная деятельность, см. Приложение 15). При сумме нормированных показателей по всем факторам ≥ 20 у обследуемого диагностируется состояние глубокого расслабления с выраженным преобладанием парасимпатической сердечной активности в вегетативном балансе СНС-ПНС.

[ФК2] Функциональный класс **"Норма с преобладанием симпатической активности"** ($SDNN_n$ $5 \div 9$, b_{1n} $1 \div 4$, M_n $1 \div 4$, диапазон $1 \div 11$) - на фоне высоких значений по первому и второму фактору наблюдается рост сердечного ритма (снижение по третьему фактору - преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе). Данный функциональный класс диагностируется у лиц с высоким тонусом активности в состоянии покоя, а также при экономичной регуляции сердечного ритма в процессе психической нагрузки (см. Приложение 15).

Если в ситуации психической нагрузки диагностируются первые два функциональных класса ("Норма" и "Норма с преобладанием симпатической активности"), и значения нормированного показателя $SDNN_n \geq 7$, это указывает на вероятность нарушений сердечного ритма и требует дополнительного клинического анализа ЭКГ (согласно данным клинических наблюдений).

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

слабление, глубокий сон, для которых будет характерна определенная выраженность нормированных показателей [Машин В.А., 2007b].

[ФК3] Функциональный класс "Эмоциональное возбуждение" ($SDNN_n$ $5 \div 9$, b_{1n} $5 \div 9$, M_n $5 \div 9$, диапазон $1 \div 13$) - в этом состоянии регистрируется снижение значений лишь по второму фактору (рост доли активности надсегментарного уровня в регуляции сердечного ритма – повышение показателя b_1), что характерно для эмоционального возбуждения, вызванного ожиданием выполнения ответственного задания, неопределенностью предстоящих действий и повышенной вероятностью совершения ошибок [Меденков А.А., Рысакова С.Л., 1996; Симонов П.В., 1981] (см. Приложение 15). При $SDNN > 61$ мс у обследуемых диагностируется выраженное эмоциональное возбуждение.

[ФК4] Функциональный класс "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" ($SDNN_n$ $5 \div 9$, b_{1n} $5 \div 9$, M_n $1 \div 4$, диапазон $1 \div 12$) - к характерным для предыдущего функционального класса изменениям добавляется рост ЧСС (снижение по третьему фактору – преобладание симпатической сердечной активности в симпато-вагусном балансе). Функциональные состояния данного класса диагностируются у лиц с невротической симптоматикой, когда эмоциональное возбуждение сопровождается выраженными психическими переживаниями по поводу конфликтной ситуации [Машин В.А. и др., 1997; Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000] (см. Приложение 15). Класс функциональных состояний "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" может диагностироваться и в ситуации ожидания ответственного задания. При $SDNN > 54$ мс или $VLF_{nu} > 60\%$ ($VLF_{nu} = 100 \times VLF/TP$) у обследуемых диагностируется выраженное эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической сердечной активности.

Последние два функциональных класса крайне важны при оценке эффекта воздействия эмоционального компонента психических нагрузок. Ряд авторов полагают, что различные формы эмоционального возбуждения отражают тревожные переживания, которые способствуют мобилизации ресурсов организма, поиску оптимальных решений и, в конечном итоге, преодолению сложных ситуаций [Каплан А.Я., 2003; Симонов П.В., Фролов М.В., 1988; Damasio A.R.,

1994]. Для обоих выделенных нами функциональных классов эмоционального возбуждения характерны высокие значения показателя b_1 и показателя SDNN. Это указывает на преобладание активности надсегментарных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма при высоком общем тоне ВНС (мобилизация ресурсов организма на решение задачи – мобилизационная фаза эрготропной деятельности). Пример выраженного роста общей ВСР (повышение показателя CV в 2.5 раза относительно состояния покоя) у спортсменок высокой квалификации в ситуации ожидания начала соревнований (предстартовое эмоциональное возбуждение), продемонстрирован в исследовании В.М. Зацорского и С.К. Сарсания [1968]. Процессами эмоционального возбуждения можно объяснить рост общей ВСР (SDNN) и электропроводимости кожи у курсантов в последнюю минуту выполнения на тренажере приземления самолета на борт авианосца [Lindholm E., Cheatham C.M., 1983]. Рост общей ВСР (SDNN) был установлен у крыс при моделировании эмоционального стресса (кратковременная гипокинезия при иммобилизации в нормальном положении) [Дворников А.В. и др., 2003]. В статье [Riediker M. et al., 2005] представлены уникальные результаты анализа амбулаторного Холтер-мониторинга ЭКГ полицейского из дорожного патруля Северной Каролины (США). Регистрация ЭКГ совпала с террористической атакой 11 сентября 2001 года на США. Показатели ВСР (ЧСС, SDNN и pNN50) полицейского изменились немедленно после того, как он услышал о террористической атаке. ЧСС повысилась, pNN50 снизилась (высокочастотный компонент ВСР), при этом общая вариабельность сердечного ритма (SDNN) сильно возросла. Рост общей ВСР при снижении высокочастотной составляющей сердечного ритма косвенно указывает на значительный рост низкочастотных компонентов сердечных колебаний, что сопровождается ростом показателя b_1 .

Рост спектральной мощности сердечного ритма в VLF диапазоне на фоне повышения общей ВСР (SDNN) в ситуациях эмоционального возбуждения и тревоги был обнаружен в исследованиях [Машин В.А. и др., 1997; Машин В.А., Машина М.Н., 2000, 2001; Хаспекова Н.Б., Вейн А.М., 1999; Хаспекова Н.Б.,

2003; Mashin V.A., Mashina M.N., 2000]. Увеличение мощности VLF колебаний и ее относительное доминирование в спектре сердечного ритма у лиц с высокой тревожностью (по тесту Люшера) было установлено в исследовании [Маляренко Т.Н. и др., 2000]. Мощность и относительный вклад VLF компонента возрастают в условиях острого [Меницкий Д.Н. et al., 1978; Ueda G. et al., 1984] и хронического эмоционального стресса [Хаспекова Н.Б. и др., 1989, 1991; Хаспекова Н.Б., 1992]. В лонгитюдном исследовании [Theorell T. et al., 2007] у музыкантов симфонического оркестра, на глазах которых один из членов духовой группы дважды падал в обморок во время концерта, был отмечен значимый рост VLF компонента ВСР, вызванный этим событием. В эксперименте [Laude D. et al., 1997] состояния эмоционального возбуждения (ситуация соперничества) во время захватывающей компьютерной видеоигры сопровождались повышением общей ВСР и ростом спектром мощности в низкочастотных диапазонах (VLF показатель не оценивался). А. Richter с коллегами [1990] при моделировании у кроликов пассивного избегания негативной ситуации и активной ориентировочной реакции обнаружили общее увеличение ВСР (SDNN) за счет усиления колебаний VLF диапазона, а также рост ЧСС. При этом авторы показали, что рост VLF колебаний не был обусловлен движениями животных. В исследовании [Blanc J. et al., 1994] эмоциональный стресс у крыс моделировался с помощью сильной струи воздуха. Он вызвал рост ЧСС, общей ВСР и мощности спектра в пересечении VLF и LF диапазонов (0.0195÷0.0605 Гц). Эту реакцию авторы объяснили через повышение симпатического тонуса в условиях эмоционального стресса при активации корковых влияний на нижележащие центры вегетативной регуляции. В эксперименте [Хватова М.В. и др., 2002] у всех испытуемых стрессорное воздействие (эмоциональный компонент психической нагрузки) способствовало перестройки волновой структуры сердечного ритма в направлении увеличения мощности очень медленноволновых периодических составляющих (VLF). Как отмечают авторы, такое повышение мощности VLF волн свидетельствует об эмоциональном стрессе и повышении централизации

управления сердечным ритма (активация надсегментарных отделов головного мозга).

Эмоциональное возбуждение оператора в процессе выполнения профессиональных задач может быть вызвано ошибочными действиями¹⁸ и осознанием всей серьезности их последствий, давлением времени¹⁹ и трудностями принятия решения в ситуациях чрезмерной психической нагрузки, когда оператор должен обработать большой объем информации за короткий период времени, а затрачиваемые психические усилия не позволяют достичь требуемого результата [Norman D.A., Bobrow D.G., 1975; Wickens C.D., Hollands J.G., 2000]. Именно всплеском эмоционального возбуждения можно объяснить рост ВСП в исследовании [Rowe D.W. et al., 1998], когда профессиональные диспетчеры испытывали психическую нагрузку на внимание и оперативную память, с которой не могли справиться (общая дизрегуляция деятельности). Такая же динамика наблюдалась и в исследовании [Brinkman W.P. et al., 2004], когда участники были вынуждены выполнять сложные расчеты стоимости строительных работ с помощью калькулятора, у которого был слишком маленький дисплей, и в эксперименте [Aasman J. et al., 1987] при чрезмерной нагрузке на оперативную память (ухудшение деятельности и рост ВСП), и в полевом эксперименте на вождении [Richter P. et al., 1998], когда чрезмерная нагрузка на водителя вела к снижению скорости и росту ВСП (SDNN).

Выделенные с помощью трехфакторной модели ВСП функциональные классы "Эмоциональное возбуждение" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" позволяют, как мы полагаем, более глубоко исследовать влияние эмоционального компонента психических нагрузок на функциональное состояние человека. Примеры таких исследований представлены в главе 4. Отметим также, что различные формы выраженного

¹⁸ Влияние неуспешных реакций на показатели ВСП испытуемых исследовано в работе А.Я. Каплан [1999].

¹⁹ Результаты изменений показателей ВСП при ограничении времени выполнения работ (спешке) представлены в докладе [Wilamowitz-Moellendorff M. et al., 2005].

эмоционального возбуждения в ситуации ожидания выполнения ответственных заданий и после их выполнения, диагностировались нами также у лиц с признаками алкогольной зависимости.

Рассмотрим теперь следующие четыре функциональных класса, общим для которых является снижение значений по фактору общего тонуса ВНС ($SDNN_n$).

[ФК5] Функциональный класс **"Психическое напряжение"** ($SDNN_n$ 1÷4, b_{1n} 5÷9, M_n 1÷4, диапазон 1÷11) - при данном функциональном классе наблюдается снижение общего тонуса ВНС, рост активности надсегментарных структур и уменьшение влияния вагуса в регуляции сердечного ритма. Функциональные состояния данного класса типичны для воздействия когнитивного компонента психической нагрузки и отражают разные степени психического напряжения и концентрации усилий субъекта на задаче (исполнительная фаза эрготропной деятельности, см. Приложение 15). При $SDNN \leq 14$ мс или $b_1 \geq 0.92$ у обследуемых диагностируется выраженное психическое напряжение, в поведении может отмечаться тремор, импульсивность. Чрезмерное психическое напряжение может вести к снижению скорости и безошибочности выполнения психических задач [De Waard D., 1996; Meister D., 1976; O'Donnell R.D., Eggemeier F.T., 1986]²⁰. При $VLF_{nu} > 60\%$ регистрируется выраженное преобладание активности надсегментарных структур в регулировании сердечного ритма (скрытая невротическая симптоматика).

[ФК6] Функциональный класс **"Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса"** ($SDNN_n$ 1÷4, b_{1n} 5÷9, M_n 5÷9, диапазон 1÷12) - этот

²⁰ Одно из объяснений снижения работоспособности при повышении критического уровня психического напряжения заключается в том, что оно "сужает" внимание [Апчел В.Я., Цыган В.Н., 1999]. Первоначально в механизмах поведения человека происходит "отбрасывание" менее значимых и "балластных" сигналов, что способствует сохранению эффективности деятельности. Затем дальнейшее "сужение" внимания сверх критического порога ведет к потере значимых сигналов и к снижению эффективности как внимания, так и деятельности в целом.

функциональный класс отличается от предыдущего парадоксальным повышением показателя M (рост вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе регуляции сердечного ритма). Функциональные состояния данного класса характерны для психического утомления с астено-невротической симптоматикой, а также, согласно клиническим наблюдениям, могут служить индикаторами патологических процессов и вызванных ими ипохондрических мыслей (снижение функциональных резервов организма и рост невротических реакций при развитии таких тяжелых заболеваний, как, например, атеросклероз, рак; см. Приложение 15). Так, в исследовании [McCarty R. et al., 1997] были проанализированы показатели ВСП для пациентов с синдромом хронической усталости. Авторы установили значимое снижение SDNN, VLF, LF, HF и RMSSD в группе пациентов в сравнении с контрольной группой здоровых добровольцев. При этом частота сердечных сокращений не различалась между группами. Схожие результаты исследований лиц с синдромом хронической усталости были получены в работе [Sisto S.A. et al., 1995].

Согласно нашим данным, при $SDNN \leq 14$ мс или $b_1 \geq 0.92$ у обследуемых диагностируется выраженное психическое напряжение с преобладанием вагусной сердечной активности, что может свидетельствовать о выраженном психическом утомлении.

[ФК7] Функциональный класс **"Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур"** ($SDNN_n 1 \div 4$, $b_{1n} 1 \div 4$, $M_n 1 \div 4$, диапазон $1 \div 10$) - характеризуется парадоксальным преобладанием активности сегментарных структур головного мозга в регуляции сердечного ритма на фоне психического напряжения. Остается пока неясным, чем может быть вызвана такая динамика показателей ВСП. Но при выраженном снижении показателей первого и третьего фактора (при низком общем тоне ВНС и высоком преобладании СНС в симпато-вагусном балансе) на ритмограмме регистрируется парадоксальный низкоамплитудный высокочастотный хаос ($SDNN \leq 14$ мс и $b_1 \leq 0.30$). Согласно клиническим наблюдениям, диагностика такого хаоса может служить индикатором развития различных сердечно-сосудистых заболеваний

(например, нарушения сердечного ритма). Возможно, данный функциональный класс является ранним предвестником сердечно-сосудистых нарушений (см. Приложение 15).

[ФК8] Функциональный класс **"Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур"** ($SDNN_n 1 \div 4$, $b_{1n} 1 \div 4$, $M_n 5 \div 9$, диапазон $1 \div 11$) - на фоне снижения общего тонуса ВНС сохраняется парадоксальное преобладание активности сегментарных структур головного мозга и вагусной сердечной активности в регуляции сердечного ритма. Функциональные состояния данного класса характерны для хронического психического утомления, глубокого снижения функциональных резервов (см. Приложение 15). При $SDNN \leq 14$ мс у обследуемых диагностируется выраженное психическое напряжение с преобладанием вагусной сердечной активности и активности сегментарных структур, что может свидетельствовать о выраженном психическом утомлении.

Важно отметить, что при характеристике функциональных классов "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур" речь идет именно о *преобладании* активности вагуса в вегетативном балансе при *снижении его тонуса* на фоне снижения общего тонуса ВНС (снижение абсолютного уровня стохастического шума в динамике сердечного ритма при сохранении его относительного уровня, см. главу 2.4). Точно также мы говорим о *преобладании* активности сегментарных структур над кортико-лимбическими (надсегментарными) *при снижении их тонуса*, характеризуя функциональные классы "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур". В этом принципиальное отличие рассмотренных ранее первых четырех классов функциональных состояний. Так классы функциональных состояний "Норма с преобладанием симпатической активности" и "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" отличает не только доминирование симпатической активности в симпато-вагусном

балансе, но и высокая тоническая активность СНС. При функциональном классе "Норма" преобладает вагусная активность в симпато-вагусном балансе и наблюдается его высокая тоническая активность [Porges S.W., 1995a, 2001]. Функциональные классы эмоционального возбуждения (ФК3 и ФК4) характеризуются как преобладанием активности надсегментарных структур головного мозга, так и их высокой тонической активностью (см. Приложение 11).

Остановимся подробнее на функциональных классах "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур", для которых характерно психическое утомление: парадоксальное преобладание активности вагуса (возрастание длительности R-R интервалов) на фоне снижения общего тонуса ВНС (уменьшение SDNN). Вопросы ранней диагностики процессов утомления, включая методы анализа ВСР, давно привлекают внимание ученых [Бавевский Р.М., 1979; Кудрявцева В.И., Сычев В.А., 1976]. Но очень часто исследователи в своих работах ошибочно подменяют процессы утомления процессами монотонии. Рассмотрим эту проблему с позиций трехфакторной модели ВСР.

Еще в 1908 году R. Yerkes и J. Dodson [1908] экспериментально показали, что при низком уровне активации (возбуждения) нервной системы, задания животными выполнялись медленнее и с ошибками. По мере роста уровня активации число ошибок уменьшалось, а скорость выполнения увеличивалась. Однако после превышения определенного уровня активации результаты вновь ухудшались: время выполнения задания увеличивалось, возрастало число ошибок. Так была установлена закономерность между уровнем активации нервной системы и продуктивностью, получившей название инвертированной "V-образной" кривой. Последующие исследования позволили связать низкий уровень активации с негативными процессами монотонной деятельности (недостаточная стимуляция), которая, по мнению L. Levi, вызывает стресс, а чрезмерная психическая нагрузка (чрезмерная стимуляция) - дистресс [1972].

Функциональное состояние монотонии и скуки часто ассоциируют с психическим утомлением. Но психическое утомление является следствием высокой или длительной психической нагрузки, которая приводит к потере энергетических ресурсов для выполнения психической задачи [Grandjean E., Kogi K., 1971; Hockey G.R.J. et al., 2003; Kecklund G., Akerstedt T., 2004]. Состояние же монотонии порождается однообразной деятельностью с низкой психической нагрузкой [Braton P., 1970; Thiffault P., Bergeron J., 2003; Straussberger S., et al., 2004]. Например, американские исследователи установили, что доля "квазипассивной" составляющей в деятельности оперативного персонала блочного щита управления реактором (БЩУ АЭС) на атомных станциях США составляет около 70% от всего рабочего времени. Одно из негативных последствий данного факта - снижение готовности к выполнению операторами действий не только в критических, но и в нормальных ситуациях [Verwey W.B., Zaidel D.M., 1999]. Неслучайно, что большинство нарушений и аварий при управлении авиадвижением происходит в ситуации умеренной и низкой рабочей нагрузки [Stager P. et al., 1989]. Это можно объяснить снижением уровня активности (бдительности) и развитием процессов, характерных для класса функциональных состояний "Норма": низкое психическое напряжение, преобладание вагусной сердечной активности [Генкин А.А., Медведев В.И., 1973], расслабленность, которая может сопровождаться сонливостью [Dinges D., Kribbs N., 1991]. Вот, например, как описывает состояние операторов в ночную смену, когда отсутствуют активные оперативные действия, старший инженер Кольской АЭС: "Полный покой! Можете быть уверены, что на блочных щитах управления всех без исключения АЭС в стране ночью персонал дремлет. Причем не нарушители дисциплины, а грамотный, высококвалифицированный, сознательный, умеющий и желающий работать персонал" [Психология и жизнь, 1988]. Те же проблемы характерны и для машинистов современных локомотивов [Генес В.С., Мадиевский Ю.М., 1974]. Не случайно R.C. Smith [1973] в своем исследовании обнаружил, что авиадиспетчеры в большей степени предпочитали режим работы с высокой психической нагрузкой (плотностью авиационного трафика) режиму

работы с низкой психической нагрузкой, который они считали скучным, не приносящим удовлетворения, и, в общем, нежелательным. Это подтверждается и нашими исследованиями операторов АЭС, для которых были характерны личностные формы регуляции поведения [Машин В.А., 1994а, 1994б, 1994с]. Обратимся теперь к результатам психофизиологических исследований монотонной деятельности.

В 1937 году J.E. Barmack [1937] опубликовал результаты своих исследований монотонии и связанной с ней скукой. Он установил, что повышенная скука при выполнении задач связана со сниженным уровнем физиологической активности, понижением эффективности деятельности и повышением сонливости. Не случайно, что когда автор проанализировал эффекты фенамина (сильного стимулятора ЦНС) на состояние скуки в ситуации монотонной деятельности, он обнаружил рост уровня бодрствования, физиологической активности при снижении, согласно самоотчетам, ощущения скуки [Barmack J.E., 1938, 1939]. Общий вывод ранних исследований монотонной деятельности, в которых использовались показатели КГР, заключался в том, что непрерывное, однообразное выполнение простых повторяющихся задач (например, контроль приборов) сопровождается снижением уровня возбуждения (активации) нервной системы [Andreassi J.L., 1966; Davies D.R., Krkovic A., 1965; Eason R.G. et al., 1965; Stern R.M., 1966; Thackray R.I., et al., 1973]. Не случайно в исследовании [Галыгин В.Ф. и др., 1991] у операторов прокатного цеха (монотонная, однообразная работа, необходимость длительное время поддерживать состояние готовности, бдительности к активным действиям в условиях гиподинамии и сенсорной монотонии) было зафиксировано снижение ЧСС (рост доли вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе) в течение смены. При этом у операторов конвертерного цеха (ведущая функция – принятие решения в условиях "смысловой" неопределенности) было выявлено значимое увеличение ЧСС в течение смены. В экспериментах [De Waard D., 1996] длительное однообразное вождение по кольцевой дороге, вызывающее сонливость и понижение бдительности, результировалось также в снижении средней ЧСС. В экспери-

ментах [Braby C.D. et al., 1993] были получены доказательства снижения ЧСС с возрастанием рабочей незагруженности операторов. В статье [Обознов А.А. и др., 1991] представлены результаты моделирования деятельности оператора по управлению реальным производственным процессом. Основная задача операторов состояла в многочасовом (5-6 часов) непрерывном контроле текущих показателей технологического процесса. Условия деятельности - замкнутая кабина, в которой поддерживался сумеречный уровень внешней освещенности и равномерный шумовой фон. В условиях монотонной деятельности у операторов складывался типичный симптомокомплекс монотонии: субъективное переживание ощущений апатии, скуки, сонливости, потери интереса к работе. Динамика изменения вегетативных показателей свидетельствовала о преобладании парасимпатических влияний, выразившихся в снижении ЧСС, амплитуды КГР, в спектре ЭЭГ отмечалось доминирование альфа-ритма (проявление сонливости). Двигательная активность становилась минимальной. Отмечалась характерная для монотонии бедность мимики ("маскообразное лицо"), периодическая зевота, наличие длительных фиксаций взгляда в одной точке [Рождественская В.И., Левочкина И.А., 1972]. В эксперименте [Straussberger S. et al., 2004] снижение активности авиадиспетчеров, вызванное монотонной, скучной деятельностью на тренажере, сопровождалось снижением ЧСС и возрастанием общей ВСР. Развитие негативных состояний в ситуации монотонной, однообразной и скучной деятельности сопровождалось ростом общей ВСР (SDNN) и понижением, либо колебаниями внимания в исследованиях [Ettema J.H., Zielhuis R.L., 1971; Kagan J., Rosman B.L., 1964; Thackray R.I. et al., 1974].

В своем обзоре результатов различных психофизиологических исследований монотонии и скуки в лабораторных и реальных условиях, R.I. Thackray [1980] делает общий вывод, что эти состояния, вызванные низкой психической нагрузкой в процессе деятельности, связаны с низкими или сниженными уровнями физиологической активации (бодрствования) и бдительности (внимания). С внедрением автоматизированных систем управления негативное влияние монотонной деятельности на функциональное состояние оператора еще более

возрастает [Машин В.А., 1994b, 1995; Машин В.А., Никитин В.П., 1997; Thackray R.I., 1980; Thackray R.I., 1981]. Важнейшие функции - постоянный контроль и готовность к экстренным действиям – оказываются наиболее "слабым звеном" в операторской деятельности в условиях монотонии [Асеев В. Г., 1974; Горбов Ф.Д., Лебедев В.И., 1975; Обознов А.А. и др., 1991; Пономаренко В.А. и др., 1987; Пушкин В.Н., Нерселян Л.С., 1972]. Низкая психическая нагрузка может даже спровоцировать переход состояний оперативного покоя в гипнотическое состояние [Генес В.С., Мадиевский Ю.М., 1974].

Чтобы справиться со скукой и сонливостью в условиях монотонной деятельности, оператор должен приложить волевые усилия для поддержания необходимого уровня активности, бдительности [Розенблат В.В., 1975]. Опытнейший оператор АЭС в беседе с нами вспомнил такой случай времен первых лет атомной энергетики. Один дисциплинированный и старательный оператор БЩУ решил бороться с состоянием монотонии и скуки в ночную смену своеобразным способом: упорно сидеть и смотреть на щит управления "не смыкая глаз". "Борьба" проходила по границе "сонливость-сон", а весь пафос ее заключался в словах: "не закрою глаза, не закрою". Ни секунды он не давал себе расслабиться или переключиться на что-либо другое. И так все двенадцать часов на смене он проводил сидя за щитом, напряженно вглядываясь помутневшим взором на технологические схемы и приборные панели, при однообразном гудении приборов. После одной такой ночной смены он встал, сделал несколько шагов и рухнул бы в "сомнамбулическом" состоянии, если бы не подоспевшие операторы, вовремя подхватившие его абсолютно "безвольное" тело. Смена закончилась, психический волевой контроль на фоне выраженного психического утомления в результате борьбы с монотонией был снят, и оператор мгновенно "провалились" в глубокий сон.

Таким образом, состояние утомления может развиваться в ситуации монотонной деятельности только при наличии волевых усилий, направленных на длительное поддержание необходимого уровня активности и бдительности. Вот почему при моделировании монотонной деятельности исследователи могут

столкнуться как с процессами нарастания расслабления, скуки, сонливости (функциональный класс "Норма"), так и с процессами психического волевого напряжения (функциональный класс "Психическое напряжение", в этом случае психическая нагрузка имеет "внутренний" источник – волевое усилие, а не внешний), которые могут вызвать психическое утомление при необходимости длительное время поддерживать нужный уровень активности и бдительности в ситуации монотонии (снижение функциональных ресурсов - функциональные классы "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" и "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур"). Это доказывают результаты эксперимента [Oron-Gilad T., Hancock P.A., 2005], в котором водители выполняли 60 минутное вождение. Деятельность носила монотонный характер. При этом авторы выделили два различных типа реакции: (1) повышение ВСП (SDNN) – действие однообразной, монотонной деятельности, эффект гипоактивности; (2) снижение ВСП – рост психического напряжения за счет волевых попыток удержать внимание на фоне монотонной деятельности. Другим примером могут служить исследования по влиянию монотонии на бдительность оператора, выполненные R.I. Thackray с коллегами [1975, 1977, 1979] по заказу федерального управления авиации США на тренажере радиолокационного дисплея. По результатам исследований ими были сформированы две противоположные группы, которые отличались различными оценками состояния монотонии и скуки после выполнения задач управления авиадвижением на тренажере радара. Оказалось, что группа с высокими субъективными оценками монотонии и скуки продемонстрировала более высокое возрастание времени реакции, общей вариабельности сердечного ритма (SDNN) и более выраженное снижение внимательности.

Таким образом, с нашей точки зрения, прав и R.I. Thackray [1980], который связывает монотонную деятельность со снижением уровня физиологической активности и внимания (развитие функциональных состояний класса "Норма" – повышение SDNN и M, снижение b_1), и L. Levi [1972], для которого монотонная деятельность выступает стрессором (развитие различных форм

утомления, вызванного продолжительными волевыми усилиями: повышение М на фоне снижения SDNN). Необходимо всегда учитывать, что монотонная, однообразная деятельность (например, контроль оператора за показаниями приборов), которая характеризуется низкой психической нагрузкой, может порождать не только функциональные состояния монотонии (снижения активности и бдительности, развитие скуки и сонливости), но и при определенных условиях (длительные волевые усилия субъекта для сохранения достаточно уровня активности и бдительности) функциональные состояния утомления [Машин В.А., 2007b]. Следовательно, причины развития психического утомления в условиях монотонной деятельности и высокой психической нагрузки различны, и различны должны быть соответствующие контрмеры, на что указывают S. Straussberger и его коллеги [2004]. В первом случае - монотонная деятельность, низкая психическая нагрузка, для предупреждения развития состояния утомления (вызванного волевыми усилиями субъекта) требуется, как это ни странно, увеличение психической нагрузки: повышение разнообразия задач, их сложности. Во втором - высокая психическая нагрузка, необходимо ее снижение, например, через уменьшение числа контролируемых авиадиспетчером самолетов²¹.

Приведем примеры работ, в которых, с нашей точки зрения, происходит смешение состояний монотонии и утомления. Так в лабораторном исследовании L.M. Schleifer и O.G. Okogbaa [1990] профессиональные машинистки набирали в течение длительного времени текст с помощью клавиатуры персонального компьютера. Авторы установили, что продолжительный ввод информации в течение рабочего дня привел к значимому снижению ЧСС и увеличению ВСР. Авторы сделали вывод о снижении психических усилий и возрастании психического утомления у машинисток. Согласно нашей квалификации функцио-

²¹ Любопытно, что еще в 1934 году А.А. Ухтомский указывал на необходимость дифференцировать явления утомления (уменьшение ресурсов человека для выполнения деятельности) и процесс торможения [Ухтомский А.А., 1934]. Первое объясняется высокой психической нагрузкой, второе – ее недостаточностью.

нальных состояний, полученные данные действительно указывают о снижении усилий, вызванного скучной и однообразной работой, но не подтверждают роста психического утомления, для которого не характерно повышение общего тонуса ВНС (SDNN). Мы полагаем, что авторы смоделировали условия монотонной деятельности (выполнение однообразных, малозначимых операций), которые вызвали развитие функциональных состояний класса "Норма" (повышение SDNN и M), сопровождавшиеся процессами расслабления (снижения психических усилий) и сонливости (снижения уровня активности). Ухудшение внимания и повышение общей ВСР (SDNN) в процессе длительного вождения (круглосуточно в течение 5 дней, свыше 586 км) было получено в эксперименте [O'Hanlon J.F., 1972]. Авторы объяснили эти негативные процессы ростом утомления участников. Но и в этом случае причина снижения внимания лежит, как мы полагаем, в монотонной, однообразной деятельности и нарастании скуки, которая стимулирует процессы сонливости и рост общей вариабельности сердечного ритма. Точно также возрастание показателей ВСР при длительных задачах визуального слежения, полученное в эксперименте [Mascord D.J., Heath R.A., 1992], является отражением не утомления, как полагают авторы, а монотонии: естественное "выключение" оператора из задачи, не требующей активного вмешательства и, как следствие, расслабление, скука и сонливость. Это подтверждается результатами ранее рассмотренных исследований [Straussberger S. et al., 2004; Thackray R.I. et al., 1975; Thackray R.I. et al., 1977; Thackray R.I. et al., 1979], в которых монотонная деятельность вела к росту показателей ВСР, снижению ЧСС на фоне возрастания ощущения скуки. В исследовании Р.М. Баевского [1979] была проанализирована деятельность операторов на тренажерах, имитирующих длительную монотонную работу (4 часа) по приему и декодированию цифровой и буквенной информации. К концу работы было отмечено небольшое повышение длительности R-R интервалов, значимое повышение вариационного размаха и мощности дыхательных волн при снижении амплитуды моды, что сопровождалось снижением индекса напряжения (ИН). Он также рассмотрел динамику ВСР у математиков вычислительного

центра и у студентов (дневного и вечернего отделений) и проанализировал умственную работоспособность в различные часы и дни недели. Согласно его данным, к концу рабочего дня частота пульса снижается, возрастает SDNN и вариационный размах. Такую динамику автор объяснял процессами утомления. Но вновь, проанализировав представленные результаты, мы должны сделать вывод о нарастании у обследуемых функциональных состояний класса "Норма" (снижение активности и психических усилий), для которых характерны высокие значения общего тонуса ВНС (рост SDNN) и преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе (рост показателя M). Возрастание мощности высокочастотных (дыхательных) волн может косвенно указывать на преобладание активности сегментарных структур головного мозга в управлении сердечным ритмом (снижение b_1). В противном случае, мы должны признать, что процессы утомления сопровождаются парадоксальным ростом общего тонуса вегетативной нервной системы (SDNN).

Приведем примеры экспериментов, в которых снижение психических усилий и активности обследуемых объясняются монотонной, однообразной деятельностью, что согласуется с нашей классификацией функциональных состояний. В работе [Haworth N.L. et al., 1988] приводятся результаты ряда исследований эффекта пролонгированного ночного вождения по кругу на сердечный ритм профессионалов-водителей. Контролировались такие показатели ВСР как M, SDNN, CV. Было установлено, что такая однообразная монотонная деятельность вызывает значимое снижение ЧСС в процессе вождения. Также исследования показали, что профессионалы-водители, которые демонстрировали в процессе вождения ухудшение выполнения поворота (снижение психических усилий), имели более высокую вариабельность сердечного ритма (SDNN). Снижение ЧСС и повышение ВСР при 8 часовом однообразном ночном вождении по кругу было обнаружено также в исследовании [Riemersma J.B.J. et al., 1977]. Данная динамика, как мы подчеркивали, характерна для длительного воздействия низких психических нагрузок, которые вызывают уменьшение активности субъектов (снижение уровня бодрствования) и развитие функцио-

нальных состояний класса "Норма". Для сравнения, в исследовании [Apparies R.J. et al., 1998] водители-профессионалы управляли различными видами трейлеров в реальных условиях транспортировки груза (моделировалась высокая психическая нагрузка). Было установлено значимое возрастание ЧСС и снижение показателей ВСР (ДСА, LF) в течение движения по маршруту. Данная динамика характерна для класса функциональных состояний "Психическое напряжение" (результат высокого уровня реальной ответственности, необходимости волевые усилия для поддержания требуемого уровня бдительности и активности в течение длительного 8 часового периода). Схожие результаты были получены в исследовании [Wilson G.F., Caldwell J.A., 2002], в котором длительная депривация сна у пилотов вызывала рост ЧСС и значимое снижение показателей ВСР как в покое, так и при выполнении задач пилотирования. В отличие от авторов мы объясняем эту динамику показателей ВСР не процессами утомления, а процессами хронического напряжения, вызванного длительной депривацией сна и необходимостью выполнения сложных и ответственных задач. Продолжение подобного эксперимента, безусловно, должно привести к истощению функциональных резервов пилотов и развитию переутомления.

В заключение рассмотрения проблемы дифференциальной диагностики утомления и монотонии заметим, что рост показателей частоты миганий [Nyoki K. et al., 1998], длительности времени сомкнутых глаз [Caffier P.P. et al., 2003] и повышения сопротивления кожи [Nishimura S., Nagumo J., 1985; Boucsein W., Ottmann W., 1996], характеризующие снижение уровня возбуждения (активации) нервной системы (что часто сопровождается сонливостью оператора), может быть вызвано как состоянием монотонии, так и состоянием утомления. Но если для монотонии характерен рост общего тонуса ВНС (SDNN), повышение абсолютных значений вагусной сердечной активности, то для утомления – снижение общего тонуса ВНС и относительное преобладание вагусной сердечной активности в симпато-вагусном балансе. Поэтому предположение ряда авторов [Kramer A.F., 1991; Wilson G.F., Eggemeier F.T., 1991; Wilson G.F., 2002b], что снижение ЧСС и возрастание ВСР (SDNN) могут служить маркерами со-

стояний сонливости и утомления, является, согласно нашей классификации, верно лишь относительно состояний сонливости. Таким образом, предложенная нами классификация позволяет объяснить низкую информативность показателя ЧСС для диагностики развития психического утомления [Баевский Р.М., 1979], поскольку для функциональных состояний класса "Норма" и функциональных состояний, отражающих психическое утомление, данный показатель мало различается.

Используя разработанную нами классификацию функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР, мы проанализировали ранее диагностированные с помощью психологических обследований четыре группы операторов с различными функциональными состояниями. Результаты анализа полностью подтвердили ранее диагностированное функциональное состояние "Норма" для первой группы операторов: все 32 человека имели функциональный класс "Норма". 30 человек из группы "Психическое напряжение" (ФС2) было классифицировано по функциональному классу "Психическое напряжение" (ФК5), а оставшиеся 2 – "Психическое напряжение с преобладанием активности сегментарных структур" (ФК7). Из группы "Эмоциональное возбуждение" (ФС3) 26 человек были классифицированы по функциональному классу "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" (ФК4) и 6 – "Эмоциональное возбуждение" (ФК3). 29 человек из группы "Психическое утомление" (ФС4) классифицировались как "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса и сегментарных структур" (ФК8 – хроническое психическое утомление) и 3 – "Психическое напряжение с преобладанием активности вагуса" (ФК6 - психическое утомление). Таким образом, классификации функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСР подтвердила ранее полученные данные и позволила сделать существенные уточнения.

В следующем параграфе мы уделим особое внимание важным методическим вопросам применения трехфакторной модели ВСР для классификации функциональных состояний человека при воздействии психических нагрузок.

Нами специально будут рассмотрены такие вопросы как влияние стационарности анализируемого временного ряда R-R интервалов и его длительности на классификацию функциональных состояний человека с помощью трехфакторной модели ВСР [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007].

3.3. ВОПРОСЫ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВЫБОРОК КАРДИОИНТЕРВАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТРЕХФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Математический аппарат спектрального анализа разработан с учетом предположения, что временной ряд стационарен, то есть порождающий его механизм не меняется во времени, а соответствующий процесс достигает статистического равновесия [Ллойд Э. и др., 1990]. На практике это выражается в оценке моментов первого и второго порядков: математическое ожидание и дисперсия ряда должны быть постоянны во времени [Wei W.S., 1990]. Данное предположение накладывает требование контроля стационарности при расчете спектральных характеристик variability сердечного ритма, что нашло отражение в различных методических рекомендациях [Баевский Р.М. и др., 2001; Malik M. et al., 1996]. На важность контроля эффектов нестационарности указывают ряд работ по variability сердечного ритма [Баевский Р.М. и др., 1984; Копаев В.В. и др., 1970; Berntson G.G. et al., 1997; Friedman V.H. et al., 2002; Grossman P., 1992a; Porges S.W., Bohrer R.E., 1990; TenVoorde B.J. et al., 1997; Weber E.J. et al., 1992a, 1992b]. Для выполнения указанного требования, исследования коротких записей (от 2-х до 5-ти минут) строят таким образом, чтобы обеспечить условия стационарности процесса: регистрация производится в состоянии покоя, в процессе однообразной физической деятельности, при достижении устойчивого функционального состояния. В совершенно другой ситуации находится исследователь, когда он пытается проанализировать динамику сердечных сокращений в процессе выполнения сложной и ответственной психической деятельности, когда непосредственным действиям предшествуют

периоды тревожности, эмоционального возбуждения, напряжения, которые могут наблюдаться также в процессе и после окончания выполнения. В этом случае динамика ритма сердца может быть далека от стационарной.

Как отмечают ряд авторов, нарушение стационарности может породить смещение оценок вагусного контроля ритма сердца при выполнении анализа variability сердечного ритма [Grossman P., 1992a; Porges S.W., Bohrer R.E., 1990]. Однако строгое следование требованию стационарности может привести к преувеличению подобного рода оценок, когда спектральный анализ выполняется на стационарных временных сегментах, выделенных из нестационарного временного ряда. Такие оценки, как считают ряд исследователей, могут быть даже более смещенными, чем спектральные оценки, полученные из исходного нестационарного временного ряда [Grossman P., 1992a; Weber E.J. et al., 1992a]. В работе [Friedman V.H. et al., 2002] было специально исследовано влияние нестационарности на некоторые показатели вагусного контроля ритма сердца: MSD (средняя абсолютная разность между последовательными R-R интервалами), ДСА (дыхательная синусовая аритмия), HF (мощность спектра ритма сердца в высокочастотном диапазоне). Регистрация ритма сердца производилась как в покое (сидя и лежа), так и при выполнении функциональных проб (сжатие кистью динамометра, контролируемое дыхание, холодной прессорный тест, видеоигра с денежным поощрением). Данные, полученные от 21 здоровой женщины, позволили авторам сделать вывод, что зафиксированная в условиях эксперимента нестационарность временного ряда играет незначительную роль при расчете использованных в исследовании показателей вагусного контроля ритма сердца. Слабый эффект нестационарности на значения спектрального показателя HF подтверждается также и другими работами [Grossman P., 1992a; Grossman P., 1992b].

Противоречивость взглядов на проблему стационарности подтолкнуло нас проанализировать влияние фактора нестационарности на диагностику функциональных классов [Машин В.А., 2007a; Mashin V.A., 2007]. Дополнительно был исследован эффект нестационарности на широкий спектр показате-

лей variability сердечного ритма. Диагностика функциональных классов выполнялась с помощью рассмотренной выше трехфакторной модели ВСР [Машин В.А., Машина М.Н., 2004].

Другим вопросом, который мы рассмотрели в этом исследовании, была длительность анализируемого временного ряда. Как правило, в методических рекомендациях стандартная длительность кратковременных записей составляет 5 минут [Баевский Р.М. и др., 2001; Malik M. et al., 1996]. Но в реальности особенности исследовательской программы (скоротечность вызываемых функциональных состояний) или ограничения регистрирующих приборов (продолжительности записи физиологического сигнала) требуют от исследователя анализировать более короткие сегменты ЭКГ [Dekker J.M. et al., 1997; Singh D. et al., 2004]. Этот вопрос является исключительно важным для разработок адаптивной автоматики, поскольку очень большая длительность сегмента для анализа в режиме on-line может быть недостаточно чувствительной к кратковременным, но значимым изменениям в психической нагрузке. С другой стороны, определенный минимум длительности анализируемого сегмента необходим для надежной оценки физиологического показателя [Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003].

В работе [McNames J. et al., 2003] представлены результаты сравнения 9 показателей variability сердечного ритма, рассчитанные по записям ЭКГ длительностью от 10 сек до 10 минут (базовыми оценками служили значения показателей, полученные на 5 минутных сегментах). В анализе были использованы 54 длительные записи ЭКГ (21.4÷24.2 часа) с нормальным синусовым ритмом (30 мужчин, возраст 28.5÷76 лет, и 24 женщины, возраст 58÷73 лет) из PhysioBank Databases [Goldberger A.L. et al., 2000; Moody G.B. et al., 2001]. По каждой длительности сегмента для анализа были отобраны 1000 выборок. Оценивались следующие показатели: SDNN, RMSSD, LF, HF, отношение LF/HF и общая мощность спектра (TP). Согласно полученным в данном исследовании результатам, варьирование длительности записи приводит к значительному изменению значений рассчитываемых показателей. Наименьшую чувствительность к длительности записи продемонстрировали показатели HF и RMSSD

(высокочастотные фильтры). Но необходимо отметить, что авторы не оценивали статистическую значимость полученных данных, все выводы делались лишь на основе визуальной оценки графиков результатов. В исследовании J.E. Richards [1995] надежность расчета ДСА была оценена с помощью альфа-коэффициента Кронбаха для выборок 5, 15, 25 и 60 секунд. Надежность ДСА была высокой (альфа > 0.8) для выборок длительностью 25 и 60 сек, но снижалась при меньшей длительности анализируемых выборок. В статье [Thong T. et al., 2003] представлены результаты исследования точности оценок трех показателей ВСР (SDNN, RMSSD и HF) для ультракоротких длин записи 10 сек. Согласно полученным данным, показатель RMSSD, рассчитанный по 10 сек записям, может рассматриваться как надежная оценка 5 мин показателя RMSSD. Результаты для показателя HF по 10 сек записям имели ту же тенденцию, но не достигли статистической значимости. Надежность оценок для 10 сек записей показателя SDNN отсутствовала.

В исследовании [Prinzel L.J. 3rd. et al., 2003] были рассчитаны оценки внутри-субъектной надежности показателя "0.1 Гц компонент" как функции длительности анализируемого сегмента R-R интервалов. Для каждого участника была получена 30 мин запись кардиоинтервалов для трех уровней сложности слежения. Показатель ВСР рассчитывался для различной длительности записи от 10 до 200 сек. Анализ полученных результатов привел к выбору 30 сек записи как минимальной для надежного определения показателя "0.1 Гц компонент" в условиях психической нагрузки.

Учитывая важность использования коротких записей ЭКГ в реальных экспериментальных программах, на втором этапе нашего исследования мы изучили возможность диагностики функциональных классов с помощью трехфакторной модели ВСР на временных рядах короче 256 R-R интервалов: $128 \div 16$ R-R. Также мы исследовали эффект длительности временного ряда на оценку показателей variability сердечного ритма.

В эксперименте приняли участие 239 кандидата на оперативные должности АЭС, которые проходили профессиональный отбор в ЛПФО НВУТЦ. У

всех кандидатов отсутствовали нарушения здоровья (средний возраст = 28.21 лет, SD = 6.18 лет).

Для анализа variability сердечного ритма методами временной области рассчитывались следующие показатели: M (средний R-R интервал), Mo (мода - наиболее часто встречающееся значение R-R интервалов), SDNN (среднее квадратическое отклонение R-R интервалов), CV (коэффициент вариации R-R интервалов), AMo (амплитуда моды - доля R-R интервалов анализируемого временного ряда, соответствующих значению моды), MxDMn (вариационный размах - разность между длительностью наибольшего и наименьшего R-R интервала), RMSSD (квадратный корень из среднего значения квадратов разностей величин последовательных R-R интервалов), pNN50 (доля последовательных R-R интервалов, различие между которыми превышает 50 мс), ИН (индекс напряжения регуляторных систем по Р.М. Баевскому). Напомним, что согласно исследованиям [Hayano J. et al., 1991; Kleiger R.E. et al., 1995], между показателями MSD и RMSSD имеется высокая положительная корреляционная связь, приблизительно 0.9.

Методами частотной области рассчитывались спектральные показатели variability сердечного ритма: мощность спектральной плотности (в мсек^2) в высокочастотном (HF, 0.15-0.4 Гц), низкочастотном (LF, 0.04-0.15 Гц) и очень низкочастотном (VLF, ≤ 0.04 Гц) диапазонах. Дополнительно анализировались следующие нормированные спектральные показатели: HF/TP (TP – общая мощность спектра), $\text{HF}_{\text{nu}} = \text{HF}/(\text{HF}+\text{LF})$ и $\text{LF}_{\text{nu}} = \text{LF}/(\text{HF}+\text{LF})$, а также отношение LF/HF. Не трудно заметить, что LF_{nu} можно выразить через HF_{nu} следующим образом: $1 - \text{HF}_{\text{nu}}$. Поэтому в последующем мы использовали только HF_{nu} индекс. Из показателей графа сердечного ритма в анализ были включены: ND (число узлов графа), NRib (число ребер графа) и b_1 (тангенс угла наклона линии регрессии графа).

Программа регистрации ЭКГ обследуемых включала в себя 3 стадии (условия). На первой стадии регистрация ЭКГ производилась в положении лежа (покой, длительность 10 минут). Вторая стадия представляла собой ситуацию

ожидания (антиципации) обследуемыми начала ответственных тестовых испытаний (положение "сидя в кресле", длительность 10 минут). На третьей стадии ЭКГ регистрировалась в процессе восстановительного периода после выполнения тестовых испытаний (положение "сидя в кресле", длительность 10 минут). Инструкция требовала от обследуемых сидеть (лежать) спокойно, не делая посторонних движений, не разговаривать. Все обследования проводились в первой половине дня. Функциональные классы обследуемых рассчитывались для каждой стадии регистрации ЭКГ на основе трехфакторной модели ВСП (см. глава 3.2).

Для статистического анализа эффектов нестационарности на каждой стадии регистрации ЭКГ использовались средние значения показателей variability сердечного ритма для 239 обследуемых, рассчитанные по "скользящим" выборкам объемом 256 и шагом 10 R-R интервалов. Для анализа влияния длительности временного ряда кардиоинтервалов дополнительно для каждой стадии регистрации ЭКГ были рассчитаны показатели variability сердечного ритма по "скользящим" коротким выборкам длительностью 128, 64, 32 и 16 (с шагом 10) R-R интервалов (базовая выборка – 256 R-R интервалов). Из коротких сегментов удалялся линейный тренд, затем они "клонировались" до размера базовой выборки.

В табл. 12 представлена частота диагностирования функциональных классов, согласно трехфакторной модели ВСП, с учетом критерия стационарности выборок и без учета. Для оценки согласия между частотами на каждой стадии регистрации ЭКГ вычислялся критерий Пирсона (χ^2). Предварительно были объединены данные по ячейкам с частотой менее 5 [Ллойд Э. и др., 1989] (для стадий "Лежа" и "Перед тестом" - ФК2 и ФК7, и для стадии "После теста" – ФК2, ФК7 и ФК8). Полученные величины критерия Пирсона для всех трех стадий, соответственно, $\chi_1^2 = 0.262$ ($p < 1.0$); $\chi_2^2 = 0.506$ ($p < 1.0$); $\chi_3^2 = 0.981$ ($p < 0.964$), позволяют принять гипотезу, что нестационарность сердечного ритма в выборках объемом 256 R-R интервалов не влияет статистически значимо на частоту диагностирования функциональных классов. Отметим характерное

преобладание функционального класса "Норма" (ФК1) при регистрации ЭКГ на стадии "Лежа" и рост частоты различных форм эмоционального возбуждение (ФК3 и ФК4) и психического напряжения (ФК5) на стадиях "Перед тестом" и "После теста".

Таблица 12.

Частота диагностирования функциональных классов (ФК) на различных стадиях исследования (в скобках указаны проценты) при соблюдении критерия стационарности (St) и без (NSt) [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007].

ФК	Лежа		Перед тестом		После теста	
	St	NSt	St	NSt	St	NSt
1	91 (38.08)	90 (37.66)	24 (10.04)	24 (10.04)	23 (9.62)	22 (9.21)
2	3 (1.26)	3 (1.26)	3 (1.26)	3 (1.26)	2 (0.84)	2 (0.84)
3	49 (20.50)	51 (21.34)	105 (43.93)	105 (43.93)	115 (48.12)	119 (49.79)
4	11 (4.60)	11 (4.60)	59 (24.69)	58 (24.27)	50 (20.92)	49 (20.50)
5	25 (10.46)	25 (10.46)	29 (12.13)	30 (12.55)	32 (13.39)	33 (13.81)
6	22 (9.21)	23 (9.62)	8 (3.35)	8 (3.35)	15 (6.28)	12 (5.02)
7	5 (2.09)	5 (2.09)	1 (0.42)	1 (0.42)	0 (0.00)	0 (0.00)
8	33 (13.81)	31 (12.97)	10 (4.18)	10 (4.18)	2 (0.84)	2 (0.84)

В табл. 13 приведены средние и стандартные отклонения показателей ВСР на различных стадиях регистрации ЭКГ с учетом фактора нестационарности. Поскольку распределение показателей не отвечало требованию нормальности, мы воспользовались непараметрическим T-критерием Вилкоксона (связанные выборки) для оценки выраженности изменений показателей ВСР при включение в расчеты нестационарных выборок.

Таблица 13.

Средние значений показателей ВСП (в скобках указаны SD) на различных стадиях исследования при соблюдении критерия стационарности (St) и без (NSt) [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007].

ВСП	Лежа		Перед тестом		После теста	
	St	NSt	St	NSt	St	NSt
M	849.1 (118.6)	849.0 (118.6)	771.6 (109.9)	771.4 (109.8)	777.5 (114.4)	777.5 (114.2)
SDNN	45.44 (16.25)	45.56** (16.34)	53.93 (20.58)	54.11** (20.69)	54.55 (19.99)	54.69** (20.09)
b₁	0.675 (0.152)	0.676** (0.151)	0.811 (0.098)	0.812** (0.097)	0.819 (0.087)	0.821** (0.086)
VLF	730.5 (658.7)	746.3** (696.6)	1560.6 (1573.3)	1587.8** (1604.5)	1561.0 (1597.0)	1583.6** (1625.5)
LF	826.5 (706.9)	825.6 (706.5)	1199.3 (891.9)	1198.0 (892.8)	1256.4 (929.0)	1254.2 (927.2)
HF	718.8 (749.4)	718.0 (747.8)	521.8 (552.4)	520.0 (548.6)	514.3 (551.4)	513.6 (550.6)
HF_{TP}	0.301 (0.149)	0.300** (0.149)	0.168 (0.942)	0.167** (0.933)	0.161 (0.890)	0.160** (0.887)
LF/HF	1.899 (1.701)	1.895 (1.690)	3.436 (2.344)	3.434 (2.341)	3.699 (2.530)	3.692 (2.522)
HF_{nu}	0.435 (0.177)	0.435 (0.176)	0.291 (0.138)	0.291 (0.138)	0.276 (0.130)	0.276 (0.130)
CV	5.325 (1.702)	5.341** (1.713)	6.940 (2.278)	6.966** (2.299)	6.960 (2.124)	6.977** (2.133)
MxDMn	265.5 (94.64)	265.9 (94.93)	287.9 (97.72)	288.3** (98.31)	291.4 (95.84)	291.6 (96.06)
AMo	45.31 (11.97)	45.21** (11.91)	40.70 (12.52)	40.59** (12.50)	40.74 (11.53)	40.65** (11.53)
Mo	849.1 (121.7)	849.0 (121.8)	775.3 (117.2)	775.2 (117.2)	783.3 (122.6)	783.4 (122.5)
ИИ	136.6 (109.3)	136.0* (108.3)	125.5 (112.6)	125.2** (112.5)	119.8 (97.41)	119.6* (97.52)

BCP	Лежа		Перед тестом		После теста	
	St	NSt	St	NSt	St	NSt
RMSSD	36.23 (17.80)	36.22 (17.80)	31.73 (15.26)	31.71 (15.24)	31.66 (15.16)	31.64 (15.14)
pNN50	15.81 (15.48)	15.80 (15.47)	11.97 (12.52)	11.94 (12.46)	11.49 (11.52)	11.48 (11.50)
ND	131.3 (41.36)	131.5** (41.38)	136.7 (42.14)	136.8** (42.20)	136.6 (39.90)	136.7 (39.90)
NRib	212.7 (35.11)	212.8 (35.14)	209.7 (37.77)	209.8 (37.71)	209.7 (36.23)	209.8 (36.23)

* - $p < 0.05$, ** - $p < 0.01$: значимость различий связанных выборок (эффект стационарности), согласно непараметрическому T-критерию Вилкоксона.

Согласно T-критерию Вилкоксона не были получены статистически значимые различия по фактору нестационарности для следующих показателей: M и Mo (значения центральной тенденции), HF, RMSSD и pNN50 (высокочастотные фильтры), LF (низкочастотный фильтр), LF/HF и HF_{nu} (индексы, производные от LF и HF) и NRib (положительно связан с высокочастотными показателями). Для всех трех стадий исследования значения данных показателей статистически не различались. Что касается высокочастотных показателей variability сердечного ритма (HF, RMSSD, pNN50), то эти данные согласуются с результатами исследований влияния нестационарности на такие оценки вагусного контроля, как MSD (RMSSD) и HF [Friedman B.H. et al., 2002]. Дополнительно мы обнаружили, что для всех трех стадий регистрации ЭКГ ("Лежа", "Перед тестом", "После теста") отсутствовал эффект фактора нестационарности на значения LF (низкочастотный показатель). Соответственно, такие производные индексы как LF/HF и HF_{nu} оказались также устойчивы к нестационарности временного ряда. Полученные данные совпадают с результатами исследования [Houtveen J.H., Molenaar P.C., 2001], в котором также обнаружен слабый эффект нестационарности на спектральные показатели BCP (LF, HF).

Согласно статистическому анализу, фактор нестационарности значимо влияет на изменение значений показателей, которые отражают очень низкочастотные характеристики спектра мощности ритма сердца (VLF, b_1), что в свою очередь приводит к смещению значений общей вариабельности сердечного ритма (SDNN) и связанных с ней показателей (CV, MxDMn, AMo, ИИ, ND). Важно отметить, что все смещения в значениях показателей, отражающих очень низкочастотные характеристики спектра мощности ритма сердца (b_1 , SDNN), не выходили за пределы нормированных границ, что позволило получить очень устойчивую диагностику функциональных классов на всех трех стадиях регистрации ЭКГ, независимую от нестационарности выборок.

На втором этапе нашего исследования мы проанализировали влияние длительности временного ряда сердечного ритма на диагностику функциональных состояний. Предварительно, используя "скользящие" выборки короткой длины (128, 64, 32 и 16 R-R интервалов), основные показатели факторной структуры нормировались по данным референтной группы, и для каждой длительности временного ряда производилась диагностика функциональных классов.

В табл. 14 приведена частота диагностирования функциональных классов на различных стадиях исследования для коротких сегментов временного ряда сердечного ритма. Для оценки согласия между частотами коротких сегментов с базовой выборкой (см. табл. 12, 256 R-R интервалов, нестационарные выборки) для каждой стадии регистрации сердечного ритма вычислялись критерии Пирсона (χ^2). Предварительно были объединены данные по ячейкам с частотой менее 5 (для стадии "Лежа" - ФК2 и ФК7, для стадии "Перед тестом" - ФК2, ФК6, ФК7 и ФК8, для стадии "После теста" - ФК2, ФК7 и ФК8). Полученные величины критерия Пирсона для всех трех стадий позволяют принять гипотезу, что только длительность временного ряда 16 R-R интервалов статистически значимо влияет на диагностику функциональных классов в положении лежа и перед тестом. Для стадии "Лежа" были получены следующие значения критерия Пирсона: $\chi_{128}^2 = 2.127$ ($p < 0.908$); $\chi_{64}^2 = 0.530$ ($p < 0.997$); $\chi_{32}^2 = 9.808$ ($p < 0.133$);

$\chi_{16}^2 = 32.137$ ($p < 0.0001$). Сравнение частот для стадии "Перед тестом" по критерию Пирсона: $\chi_{128}^2 = 2.251$ ($p < 0.690$); $\chi_{64}^2 = 2.477$ ($p < 0.649$); $\chi_{32}^2 = 6.644$ ($p < 0.156$); $\chi_{16}^2 = 10.017$ ($p < 0.040$). И, наконец, для стадии "После теста": $\chi_{128}^2 = 1.848$ ($p < 0.870$); $\chi_{64}^2 = 2.548$ ($p < 0.769$); $\chi_{32}^2 = 4.702$ ($p < 0.453$); $\chi_{16}^2 = 7.928$ ($p < 0.160$). Общий вывод заключает в том, что диагностику функциональных классов на основе трехфакторной модели ВСР можно использовать на коротких выборках в диапазоне $128 \div 32$ R-R интервала, с предварительным нормированием факторных показателей для соответствующей длины временного ряда.

Таблица 14.

Частота диагностирования функциональных классов (ФК) на различных стадиях исследования при различной длительности временного ряда: 128, 64, 32 и 16 R-R интервалов [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007].

ФК	Лежа				Перед тестом				После теста			
	128	64	32	16	128	64	32	16	128	64	32	16
1	86	87	81	75	25	25	29	34	19	22	25	22
2	3	4	4	3	3	3	3	2	3	3	2	3
3	56	54	67	82	99	95	90	88	114	111	109	106
4	13	11	12	15	55	59	55	55	52	56	53	45
5	26	26	28	26	38	37	41	42	34	34	39	45
6	20	21	23	20	11	12	12	13	14	10	8	12
7	3	4	1	2	0	0	1	1	0	0	0	1
8	32	32	23	16	8	8	8	4	3	3	3	5

Дополнительно мы проанализировали эффект длительности временного ряда на показатели ВСР. Для этого мы использовали данные по всем трем стадиям регистрации ЭКГ, сгруппировав их по четырем основным диагностированным функциональным классам: "Норма" (ФК1, N = 136), "Эмоциональное

возбуждение" (ФК3, N = 275), "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" (ФК4, N = 118) и "Психическое напряжение" (ФК5, N = 88). В табл. 15 представлены средние и стандартные отклонения показателей ВСП для функционального класса "Норма" при различной длительности сегментов кардиоинтервалов. Сравнив с помощью непараметрического Т-критерия Вилкоксона короткие выборки (128÷16 R-R интервалов) со стандартной (256 R-R интервалов), мы установили, что наиболее устойчивыми к длине временного ряда после показателя М для функционального класса "Норма" являются высокочастотные индексы вариабельности сердечного ритма: HF, RMSDD и pNN50. За исключением самой короткой выборки (16 R-R интервалов), для перечисленных показателей отсутствует статистически значимые различия между стандартной выборкой и более короткими временными рядами. Тем самым статистически подтверждаются предположения, которые были высказаны в работе [McNames J. et al., 2003] по поводу показателей HF и RMSSD, а также выводы [Richards J.E., 1995] о надежности оценок ДСА на выборках длительностью 25 сек и более. Для показателя LF (функциональный класс "Норма") подобная устойчивость была получена для выборок объемом в 128 и 64 R-R интервала, что нашло свое отражение в устойчивости для этих временных рядов таких индексов, как LF/HF и HF_{nu}.

Таблица 15.

Средние значения показателей ВСП (в скобках указаны SD) при различной длине временного ряда для функционального класса "Норма" [Машин В.А., 2007а; Mashin V.A., 2007].

BCP	256 R-R	128 R-R	64 R-R	32 R-R	16 R-R
M	931.86 (97.84)	931.69** (98.30)	931.76** (98.60)	931.95** (98.78)	932.07** (98.89)
SDNN	59.72 (16.82)	57.27 (16.33)	53.79 (15.47)	49.57 (14.19)	44.94 (13.06)
b₁	0.576 (0.133)	0.532 (0.137)	0.465 (0.141)	0.374 (0.147)	0.256 (0.150)

BCP	256 R-R	128 R-R	64 R-R	32 R-R	16 R-R
VLF	1199.93 (1010.54)	936.92 (837.39)	568.34 (515.32)	271.97 (227.48)	-
LF	1218.65 (850.90)	1218.59** (835.04)	1211.06** (840.29)	1087.29 (755.97)	997.86 (717.37)
HF	1335.23 (922.69)	1340.78** (927.46)	1347.21** (928.81)	1343.64** (917.28)	1278.29 (862.05)
HF_{TP}	37.06 (13.52)	40.62 (13.26)	46.32 (13.20)	54.04 (12.73)	62.64 (11.89)
LF/HF	1.123 (0.718)	1.132** (0.721)	1.133** (0.717)	1.055 (0.672)	1.090** (0.791)
HF_{nu}	0.519 (0.148)	0.519** (0.145)	0.522** (0.142)	0.548 (0.137)	0.563 (0.135)
CV	6.442 (1.814)	6.184 (1.774)	5.811 (1.687)	5.357 (1.553)	4.856 (1.425)
MxDMn	343.85 (94.49)	298.13 (83.86)	250.71 (74.26)	203.06 (60.33)	159.36 (47.21)
AMo	35.54 (7.50)	37.18 (7.58)	39.57 (7.47)	42.58 (7.37)	45.95 (7.14)
Mo	935.49 (103.53)	933.99** (104.27)	933.26** (104.38)	932.37** (104.52)	930.00 (103.25)
ИИ	63.91 (28.46)	79.92 (35.59)	105.26 (46.52)	145.65 (63.45)	209.37 (94.64)
RMSSD	53.66 (16.44)	53.60** (16.45)	53.53** (16.42)	53.16* (16.23)	52.37 (15.75)
pNN50	31.81 (13.23)	31.76** (13.17)	31.90** (13.10)	32.00** (13.06)	32.09 (13.09)
ND	170.69 (26.13)	100.94 (10.11)	55.83 (3.38)	29.65 (1.11)	15.35 (0.39)
NRib	239.97 (9.24)	123.46 (3.56)	62.47 (1.36)	31.46 (0.56)	15.79 (0.25)

* - $p < 0.05$, ** - $p < 0.01$: значимость различий коротких выборок со стандартной (256 R-R интервалов), согласно непараметрическому Т-критерию Вилкоксона.

Для остальных проанализированных функциональных классов ("Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" и "Психическое напряжение") смещение значений показателей variability сердечного ритма при уменьшении длительности сегмента статистически значимо возрастает. Отметим лишь устойчивость низкочастотного показателя LF при различных формах эмоционального возбуждения для длительности временного ряда 128 и 64 R-R интервала, и показателя M при "Психическом напряжении" для всех коротких сегментов ($128 \div 16$ R-R интервалов). Учитывая полученные данные можно сделать вывод, что значения среднего R-R интервала (M) и высокочастотные показатели ритма сердца (HF, RMSDD, pNN50) устойчивы к коротким временным сегментам в диапазоне $128 \div 32$ R-R интервала, когда здоровые обследуемые находятся в состоянии лежа или сидя, не испытывают психического напряжения или эмоционального возбуждения и контролируют свои спонтанные движения и речь. Показатели LF, LF/HF и HF_{nu} в этих условиях проявляют устойчивость к коротким временным сегментам в диапазоне $128 \div 64$ R-R интервала при сравнении со стандартной выборкой объемом 256 R-R интервалов.

Сформулируем кратко основные выводы представленного выше исследования. На первом этапе мы проанализировали влияние нестационарности временных рядов ритма сердца на диагностику классов функциональных состояний с помощью трехфакторной модели ВСП при различных условиях (стадиях) регистрации ЭКГ: "Лежа", "Перед тестом" и "После теста". Для всех трех стадий нами была получена высокая устойчивость диагностирования классов функциональных состояний к действию фактора нестационарности. Было установлено также, что влиянием нестационарности можно пренебречь при расчете таких показателей как M и Mo (значения центральной тенденции), HF, RMSDD и pNN50 (высокочастотные фильтры), LF (низкочастотный фильтр), LF/HF и HF_{nu} (производные индексы от показателей LF и HF) и NRib (положительно связан с высокочастотными показателями). В тоже время было обнаружено, что фактор нестационарности значимо влияет на показатели, связанные с очень

низкочастотными характеристиками спектра мощности ритма сердца: VLF и b_1 . Это в свою очередь приводит к смещению значений общей вариабельности ритма сердца (SDNN) и связанных с ней показателей (CV, MxDMn, AMo, ИИ, ND). Поэтому для корректного сравнения данных двух исследований, в которых анализируются очень низкочастотные характеристики и связанные с ними показатели вариабельности сердечного ритма, необходимо контролировать не только выборку обследуемых и условия регистрации ритма сердца, но и эффект нестационарности временных рядов.

На втором этапе исследования было проанализировано влияние длительности временного ряда сердечного ритма на диагностику классов функциональных классов. Полученные статистические данные позволяют заключить, что диагностику функциональных классов на основе трехфакторной модели ВСР можно использовать как на стандартных по объему выборках (256 R-R интервалов), так и на более коротких выборках в диапазоне $128 \div 32$ R-R интервала, с предварительным нормированием факторных показателей для соответствующей длины временного ряда.

Влияние длительности сегментов кардиоинтервалов на показатели вариабельности сердечного ритма было изучено при диагностировании четырех основных функциональных классов: "Норма", "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" и "Психическое напряжение". Статистический анализ позволил установить, что для функционального класса "Норма" значения среднего кардиоинтервала по выборке (M) и высокочастотных показателей вариабельности сердечного ритма (HF, RMSDD, pNN50) были устойчивы к изменению длительности сегмента в диапазоне $128 \div 32$ R-R интервала, а показателей LF, LF/HF и HF_{nu} в диапазоне $128 \div 64$ R-R интервала. Для других функциональных состояний такая независимость показателей вариабельности сердечного ритма была получена для "Эмоционального возбуждения" (LF, диапазон $128 \div 64$ R-R интервала) и "Психического напряжения" (M, диапазон $128 \div 16$ R-R интервала). Результаты анализа

позволяют сделать вывод, что средний R-R интервал (M) и высокочастотные показатели ритма сердца (HF, RMSDD, pNN50) устойчивы к коротким временным сегментам в диапазоне $128 \div 32$ R-R интервала, когда здоровые обследуемые находятся в состоянии лежа или сидя, не испытывают напряжения или эмоционального возбуждения (функциональное состояние "Норма") и контролируют свои спонтанные движения и речь. Показатели LF, LF/HF и HF_{nu} в этих условиях проявляет устойчивость к коротким временным сегментам в диапазоне $128 \div 64$ R-R интервала. При диагностике функциональных классов "Эмоциональное возбуждение", "Эмоциональное возбуждение с преобладанием симпатической активности" и "Психическое напряжение" уменьшение длительности стандартного временного ряда (256 R-R интервалов) может приводить к значимому смещению показателей variability сердечного ритма.

Итак, в главе 3 представлена трехфакторная модель ВСП, разработанная с привлечением методов многомерного статистического анализа. На основе трехфакторной модели ВСП рассмотрена классификация функциональных состояний и дано психофизиологическое содержание восьми функциональных классов. Исследована устойчивость диагностирования функциональных классов на основе трехфакторной модели ВСП при анализе нестационарных выборок R-R интервалов и коротких временных сегментов, с которыми часто сталкиваются исследователи при анализе психических нагрузок. В заключительной главе будут подробно представлены данные экспериментальных исследований воздействия психических и эмоциональных нагрузок на функциональные состояния человека с позиций трехфакторной модели ВСП. Выполненный цикл исследований можно также рассматривать как процедуру валидации предложенной классификации функциональных состояний на основе трехфакторной модели ВСП.