Реакция организма при воздействии стресс-стимула

Михайлов Владимир Моисеевич
специалист высшей категории, врач функциональной диагностики

Аннотация: В данном исследовании рассматривается динамика показателей вариабельности ритма сердца при воздействии стресс-стимула. Наиболее признанной методологической основой изучения и количественной оценки системы нейрогуморальной регуляции является математический анализ вариабельности ритма сердца (ВРС). Первая часть исследования основана на анализе автономной нервной системе. Во второй части исследование представленные данные кросс-анализа ВРС и вариабельность длительности дыхательного цикла. Третья часть данного исследования посвящена особенностям динамики показателей автономной регуляции при воздействии ментального и физического стресс-стимула**.** Исследование проводилось во время проведения специальной тренировки кандидатов в космонавты. 1-я группа — кандидаты в космонавты во время морской тренировки на выживаемость. 2-я группа — инструкторский состав и кандидаты в космонавты во время специальной парашютной подготовки. Результаты исследования показали разницу между физическим и эмоциональным стрессом. При физических нагрузках активация симпатоадреналовой системы сопровождается преимущественно выбросом адреналина, а при психоэмоциональном воздействии активация симпатоадреналовой системы обеспечивается за счет выброса норадреналина — нейрогенный канал.

Ключевые слова: стресс-стимул, дистресс, адаптация, нейрогуморальная регуляция, показатели ВРС, патогенетическая основа развития реакции дезадаптации

Введение: Стресс – это многоуровневая системная реакция организма на любое воздействие, которое превышает возможности селективных гомеостатических механизмов реагирования (Day T.A., 2005). Соответственно количественное измерение физиологического ответа организма человека на воздействие стресс-фактора должно основываться на многоуровневом подходе и предполагать оценку:

А) Влияния социальной среды. Наиболее значимое отрицательное влияние оказывают такие подуровни, как: низкий социально-экономический статус, неблагоприятные жизненные события, в том числе неприятный опыт детства, семейный стресс, стресс на работе, низкая социальная поддержка, а также такие мощные стрессовые воздействия как стихийные бедствия или война, приводящие к развитию социально-стрессовых и/или посттравматических стрессовых расстройств.

Б) Личностных особенностей: гнев, враждебность, тип D – личности, нейротизм.

Неблагоприятное сочетание факторов социальной среды и личностных особенностей приводит к таким отрицательным эффектам, как депрессия, беспокойство, эмоциональное выгорание. На этом фоне развивается целый ряд соматических и в первую очередь сердечно-сосудистых заболеваний. (von Känel R.).

Развитие патологии на уровне органов и тканей происходит не напрямую, а реализуется через лимбико-ретикулярный комплекс — вегетативную и эндокринную систему (Судаков К.В.). Не случайно двухчленная формула психосоматических расстройств (кортикальные нарушения — соматическая патология) дополнена введением третьего звена (вегетативная и эндокринная система), что позволяет объяснить механизмы, через которые опосредуется психическое в своем воздействии на соматические системы, и дает ключ для научного подхода к изучению психосоматических взаимоотношений (Вейн А.М.). На важную роль системы нейрогуморальной регуляции в развитии патологического процесса впервые указал в своих работах Ф. Александер (F. Alexander), предложивший

в 1950 году теорию, в которой дифференцированные психопатологические гипотезы связывались с физиологическими и патологическими соматическими процессами. В соответствии с представлениями Александера, вегетативные неврозы возникают на основе неосознанного конфликта в процессе патологического невротического развития, когда эмоциональное напряжение не может подавляться, так как сохраняются сопровождающие его вегетативные изменения. По какому варианту произойдет срыв вегетативной функции, зависит от эмоционального состояния в конкретной конфликтной ситуации. Если человеку не удается удовлетворить желание защищенности и зависимости, вегетативные реакции манифестируют в извращенном виде, что проявляется в повышении парасимпатического возбуждения. Последний эффект может приводить к непроизвольной дефекации, мочеиспусканию, сопровождаться бледностью кожных покровов (Ульмер Х.Ф.). Если подавляются возможности конкурентных и агрессивных поступков, то следствием этого является возбуждение симпатоадреналовой системы (Бройтигам В.). В то же время избыточной активации только кортико-лимбических структур недостаточно для того, чтобы вызвать заболевание. Необходима гиперреактивность (неадекватный ответ) на уровне гипоталамус — ствол мозга. Ствол мозга — это структура, которая контролирует состояние автономной нервной системы, а гипоталамус объединяет эндокринные функции и автономную регуляцию. Исходя из этих представлений, исследование уровня автономной (вегетативной) регуляции предполагает оценку подуровней: парасимпатического и симпатического отдела ВНС, вегетативной реактивности, вегетативного обеспечения деятельности, стволовых структур (барорефлекторной регуляции).

Понятие «количественная оценка общего функционального состояния и адаптационных резервов организма» во многом тождественно количественной оценке состояния системы нейрогуморальной регуляции. Осталось ответить на вопрос: как количественно измерить нейрогуморальную регуляцию в целом и вклад каждого подуровня? Существует множество подходов к решению этой задачи, но неопределенность можно устранить, применив стратегию Ньютона, которая состоит в вычленении некоторого центрального твердо установленного и надлежаще сформулированного факта и в последующем использовании его как основы дедуктивных построений относительно данного круга явлений (Генкин А.А., Медведев В.И.). Таким установленным фактом могут быть представления, выдвинутые Н. Винером, о том, что почти все процессы регуляции в биологических объектах построены как осцилляторы и основой их анализа должна быть волновая теория. Основные медиаторы системы нейрогуморальной регуляции (норадреналин (адреналин) и ацетилхолин) выделяются порциями (квантами). Дискретное изменение концентрации медиаторов приводит к ритмичным колебаниям основных вегетативных параметров и в первую очередь параметров сердечно-сосудистой системы. С технической точки зрения проще всего отслеживать колебания частоты сердечных сокращений (ЧСС). В настоящее время наиболее признанной методологической основой изучения и количественной оценки системы нейрогуморальной регуляции является математический анализ вариабельности ритма сердца (ВРС). Клиническое значение вариабельности сердечного ритма было впервые оценено в 1965 году, когда E.H. Hon и S.T. Lee отметили, что дистрессу плода предшествовала альтернация интервалов между сокращениями до того, как произошли какие-либо различимые изменения в собственно сердечном ритме. Идея о целесообразности использования математических методов анализа ритма сердца для получения количественных оценок функционального состояния человека была реализована группой отечественных ученых во главе с академиком В.В. Париным (Р.М. Баевский, О.Г. Газенко). В качестве исходных данных для такой оценки изучалась длительность интервалов RR электрокардиограммы (ЭКГ) как наиболее доступной, информативной и помехоустойчивой характеристики деятельности сердца человека. В последующем, в ходе исследований, проведенных А.Д. Воскресенским

и М.Д. Вентцелем, была предложена формализованная схема анализа и описания сердечного ритма, позволившая отказаться от неопределенных заключений о его структуре, которые основывались на визуальных наблюдениях. Сделан важный вывод о возможности прогнозирования состояния летчиков и космонавтов при воздействии факторов реального полета по ответным реакциям в наземных условиях. Дальнейшие работы Р.М. Баевского и соавт. позволили дать серьезное физиологическое обоснование наблюдаемым изменениям сердечного ритма, связать выявленные изменения с системой регуляции и фундаментальными представлениями об адаптации. Важным шагом в исследовании ВРС послужило принятие в 1996 году Международного стандарта, предложенного Североамериканским обществом электрофизиологов и Европейским обществом кардиологов. Это позволило унифицировать подходы к методике записи, анализу, оценке и физиологической интерпретации показателей ВРС.

Цель исследования: Оценив по данным ВРС общее функциональное состояние организма, мы можем более точно определить вероятность развития регуляторных и/или соматических нарушений при воздействии стресс-стимула, дать количественную оценку адаптационным резервам организма конкретного индивидуума в конкретный момент времени и на этой основе построить тактику проведения лечебно-оздоровительных мероприятий.

I. Вариабельность ритма сердца – метод исследования автономной нервной системы

1.1. Дефиниция, физиологическая классификация и анализируемые показатели вариабельности ритма сердца.

Вариабельность ритма сердца (ВРС) — это метод исследования и оценки текущего функционального состояния организма на основе качественного и количественного анализа вариативности интервалов R-R электрокардиограммы, обусловленных модулирующим влиянием вегетативной нервной системы и гуморальных факторов на пейсмекерную активность синусового узла сердца за тот или иной промежуток времени.

Методика регистрации ВРС на первый взгляд предельно проста и состоит в записи ЭКГ на протяжении того или иного установленного отрезка времени (при короткой записи от 2-х до 5 минут), с последующим измерением интервалов R-R. Однако есть ряд существенных ограничений. Во-первых, анализу подлежат только синусовые сокращения (RRNN). Во-вторых, процесс должен быть стационарным, иными словами распределение интервалов R-R должно быть нормальным. Все аномальные сокращения (экстрасистолы, эпизоды смещения водителя ритма), нестационарные участки, обусловленные глотанием, кашлем, внешними воздействиями из анализа исключаются.

Как в Международном стандарте (стандарт Европейского кардиологического общества и Североамериканского общества стимуляции и электрофизиологии), так и в Российских рекомендациях, способы анализа полученного ряда R-R интервалов рассматриваются с точки зрения математики. Соответственно выделяют методы временного анализа (включая геометрические построения), спектрального анализа и нелинейные методы измерения. Не оспаривая значимости математического подхода, более оправданным представляется использовать физиологическую классификацию, при которой математические подходы – это лишь способы, позволяющие наиболее корректным образом в конкретной ситуации измерить значения показателей ВРС.

Физиологическая классификация показателей ВРС

В соответствии с физиологической классификацией (Михайлов В.М., 2017) анализируемые показатели ВРС объединяют с учётом их возможности измерять физиологические корреляты, а именно:

1.1. текущее функциональное состояние организма.

1.2. баланс отделов автономной (вегетативной) нервной системы.

1.2.1. состояние парасимпатического отдела автономной (вегетативной) нервной

системы.

1.2.2. состояние симпатического отдела автономной (вегетативной) нервной системы.

1.3. устойчивость (стабильность) системы регуляции.

1.4. сохранность барорефлекторной регуляции.

1.1. Оценка текущего функционального состояния организма основана на измерении параметров, характеризующих вариативность сердечного ритма, а именно:

RRNN среднее, R-R max – R-R min, SDNN, общая мощность спектра (TP), площадь облака скаттерограммы (S), площадь треугольника гистограммы (индекс «святого Георга», триангулярный индекс – интеграл плотности распределения (это общее количество NN интервалов, отнесенное к максимуму плотности распределения). При этом гистограмму представляют в виде неравнобедренного треугольника. Используя математические построения, основанные на методе наименьших квадратов, склон гистограммы приближают отрезком прямой так, чтобы разница площадей смоделированного треугольника и исходной гистограммы была наименьшей. По сути триангулярный индекс отражает соотношение между основанием треугольника и амплитудой моды этого же треугольника, и, следовательно, интерпретация этого показателя приблизительно соответствует широко известному индексу напряжения (ИН) Баевского.

Индекс «Святого Георга» дает возможность оценить вариативность ритма сердца путем измерения площади гистограммы распределения частот, автоматически исключив аномально выпадающих. Исключение аномальных сокращений (артефактов, экстрасистол) достигается путем проведения касательных из вершины треугольника к основанию. Чем шире основание полученного таким образом треугольника, тем больше вариативность ритма.

1.2. Баланс отделов автономной (вегетативной) нервной системы

1.2.1. Показатели оценки состояния парасимпатического отдела автономной (вегетативной) нервной системы (ВНС).

Медиатор парасимпатического отдела ВНС – ацетилхолин. Он стремительно разрушается ацетилхолинэстеразой, что приводит к быстрым изменениям (колебаниям) сердечного ритма. Так формируется волна с коротким периодом и, соответственно, высокой частотой колебаний более 9 в 1 минуту (>0,15 Гц) (высокочастотные колебания (ВЧ)) (high frequency (HF)). Активность парасимпатического отдела ВНС в наибольшей степени зависит от акта дыхания (обеспечивает кардиореспираторную синхронизацию). Поскольку частота дыхания у человека чаще всего от 9 до 24 в 1 минуту, то и изменение колебаний ритма сердца происходит в частотном диапазоне от 0,15 до 0,4 Гц. При записи кардиоритмограммы эти волны выглядят как быстрые (высокочастотные) колебания (HF-компонент) ВРС (рис. 1).

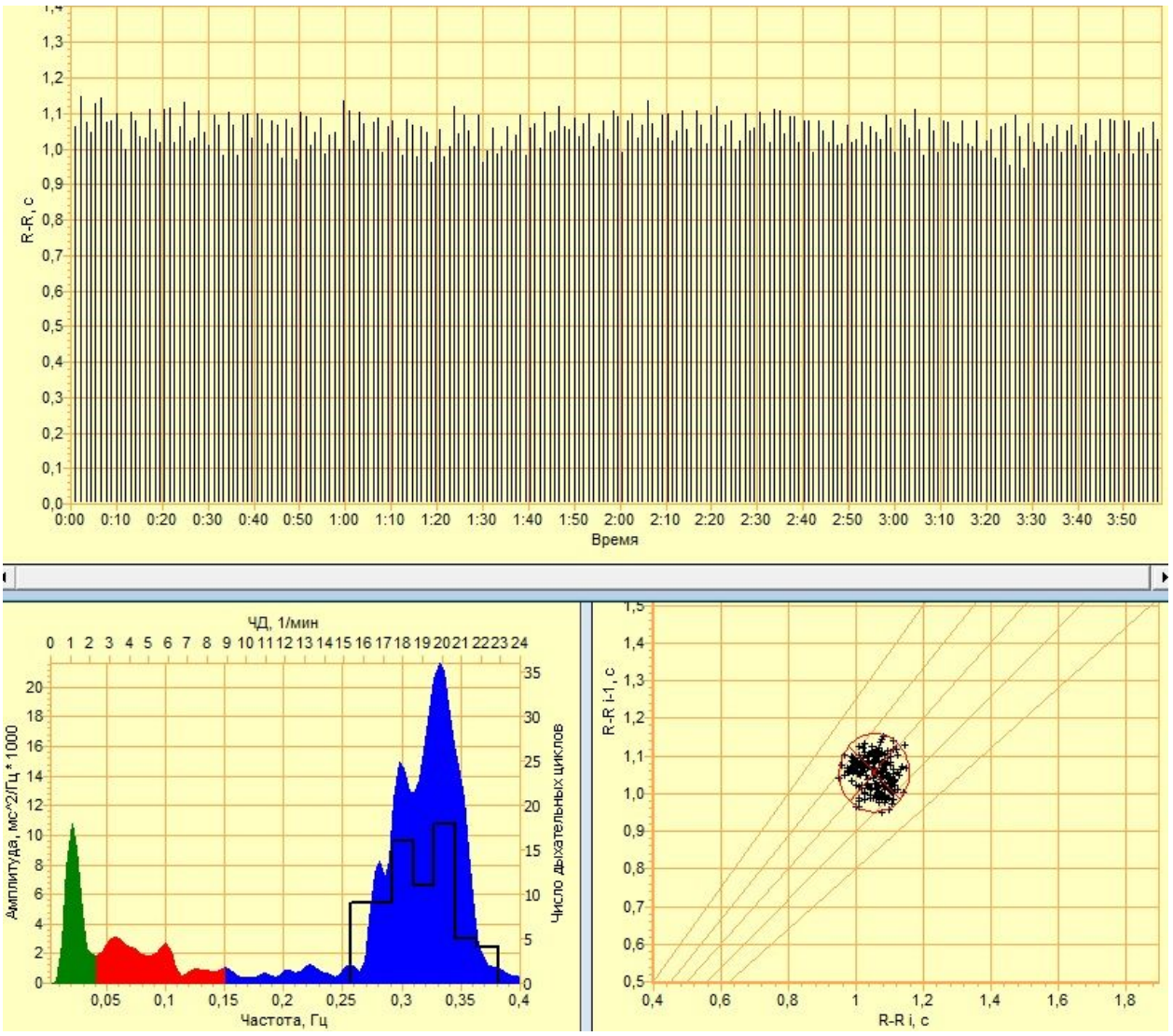

Рис. 1. Высокочастотные колебания (быстрые волны) на: а) ритмограмме (вверху); б) спектрограмме (внизу слева); в) скаттерограмме (внизу справа)
(TP = 1787 мс^2/Гц; VLF = 248 мс^2/Гц; LF = 185 мс^2/Гц; HF = 1354 мс^2/Гц; LF/HF = 0,14; L, мс =127; w, мс = 131; L/w 0,97; S, мс^2 = 26120.

Высокочастотные колебания также могут быть измерены с использованием таких показателей, как:

– RMSSD - квадратный корень средних квадратов разницы между смежными NN интервалами

– NN50 - количество случаев, в которых разница между длительностью последовательных NN превышает 50 мсек. В отдельных случаях целесообразно использовать иную разницу длительностей нормальных интервалов RRNN. В этом случае говорят о семействе NN-интервалов (NNx (мс)), где x — иная длительность интервалов NN. Используется тогда, когда средняя ЧСС сильно отличается от принятых референтных значений. К примеру, при обследовании новорожденных, при физических нагрузках, эмоциях, когда средняя ЧСС значительно превышает 100 уд/мин, использование pNN50 всегда дает нулевые значения. В этих случаях применение pNN15 позволяет применять этот показатель (Михайлов В. М. и др., 2006).

– pNN50 (%) (pNNx (%)) — процент (доля) последовательных интервалов NN, различие между которыми превышает 50 мс (x мс).

– на скаттерограмме парасимпатическую активность характеризует показатель ширины облака (w)

– на спектрограмме парасимпатическую активность отражают высокочастотные колебания (ВЧ) (high frequency (HF)) — это часть спектра в диапазоне частот 0,15–0,40 Гц (частота колебаний — 9–24 циклов в минуту). Мощность в этом диапазоне частот связана преимущественно с дыхательными движениями и отражает вагусный контроль сердечного ритма (модулирующее влияние парасимпатического отдела ВНС).

– мощность в диапазоне высоких частот, выраженная в нормализованных единицах (HF, n. u.). Вычисляется по формуле: HF, n. u. = HF / (Total – VLF) × 100.

При проведении функциональных проб парасимпатическая активность/реактивность парасимпатического отдела ВНС может быть определена по показателям:

– коэффициент 30:15 – рассчитывается при проведении ортостатической пробы;

– коэффициент дыхания при проведении пробы с глубоким управляемым дыханием (6 в 1 минуту) – отношение между средней длительностью максимальной продолжительности интервалов RR на выдохе к средней длительности минимальной продолжительности интервалов RR на вдохе;

– скорость восстановления ЧСС на 1-ой и/или 2-ой минуте после максимального нагрузочного теста.

1.2.2. Показатели оценки состояния симпатического отдела автономной (вегетативной) нервной системы (ВНС).

Медиатор симпатического отдела ВНС – норадреналин. Основной механизм формирования низкочастотных колебаний (LF-компонента) — периодически возникающие вспышки симпатической вазомоторной активности (собственный ритм сосудодвигательного центра), которые приводят к подъему артериального давления (АД). Повышение АД рефлекторно замедляет частоту сердечных сокращений (ЧСС) — барорефлекторный механизм, и мы видим на РГ характерные медленные волны (низкочастотные колебания), представленные на рис. 2.

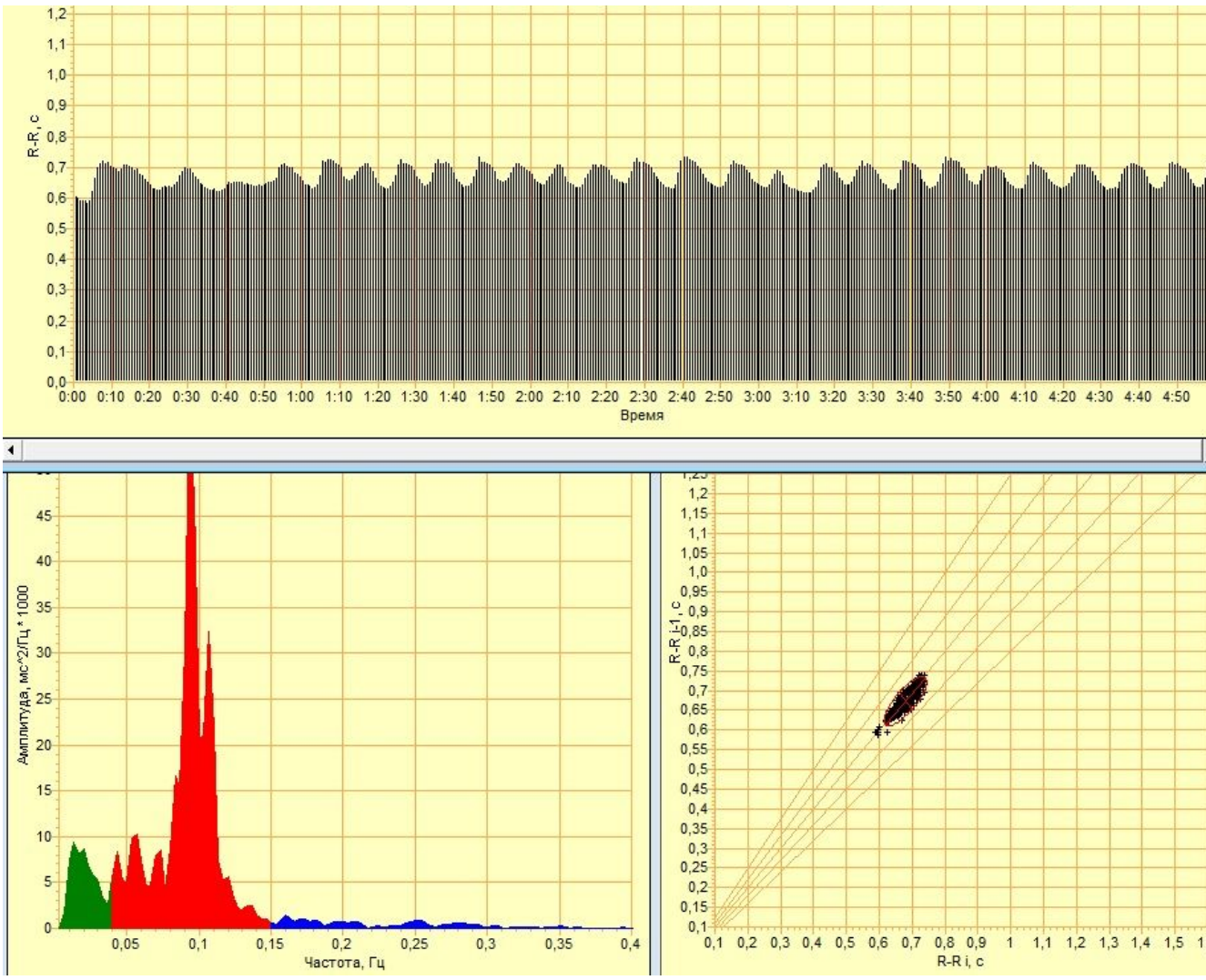

Рис. 2. Ритмограмма и спектрограмма ВРС при преобладании активности симпатического отдела ВНС: (TP = 1579мс^2/Гц; VLF = 198 мс^2/Гц; LF = 1286 мс^2/Гц; HF = 95 мс^2/Гц; LF/HF = 13,5; L, мс =122; w, мс = 41; L/w 2,98;S, мс^2 = 7806.

Помимо барорефлекторной активности эфферентное влияние оказывают и другие церебральные эрготропные структуры головного мозга. Для оценки симпатической активности преимущественно используется спектральный анализ.

– низкочастотные колебания (НЧ) (low frequency (LF)) — это часть спектра в диапазоне частот 0,04–0,15 Гц (частота колебаний — 2,4–9 циклов в минуту), а также мощность в диапазоне низких частот, выраженная в нормализованных единицах (LF, n. u.). Вычисляется по формуле: LF, n. u. = LF / (Total – VLF) × 100.

– с некоторыми оговорками, показатель длины облака на скаттерограмме также позволяет оценить состояние симпато-адреналовой активности.

При проведении функциональных проб симпатоадреналовую активность отражают показатели:

– хронотропный индекс (ХИ) – прирост ЧСС на пике нагрузки к ЧСС в покое (при максимальном нагрузочном тесте)

– коэффициент прироста ЧСС на 1-ой минуте нагрузки по сравнению с ЧСС в покое (Рис. 3). Показатель считают «мягким» психическим (ментальным) стрессом. В ходе Парижского исследования (X. Jouven et al., 2009), продолжавшегося более 20 лет, под наблюдением было 7746 французов в возрасте от 42 до 53 лет. Установлены пороговые значения мягкого ментального стресса < 4 уд/мин и > 12 уд/мин. Собственные данные для мужчин в возрасте 52,4 ± 6,6 года: разница ЧСС (Me(25;75)) на 1-ой минуте нагрузки –

ЧСС лежа = 24(21;29); разница ЧСС на 1-ой минуте нагрузки – ЧСС сидя (на велоэргометре) = 12(9;16) уд/мин.

На рисунке 3 представлена ритмограмма нагрузочного теста (велоэргометрия, ramp-протокол) пациента, проходящего врачебно-летную комиссию. ЧСС в покое сидя = 80 уд/мин. ЧСС на 1 минуте нагрузки (25 Вт) 125 уд/мин. Прирост 45 уд/мин. Спустя 2 минуты (120 сек) на фоне нарастания нагрузки ЧСС снизилось до 110 уд/мин., далее прирост ЧСС идет параллельно увеличению нагрузки.

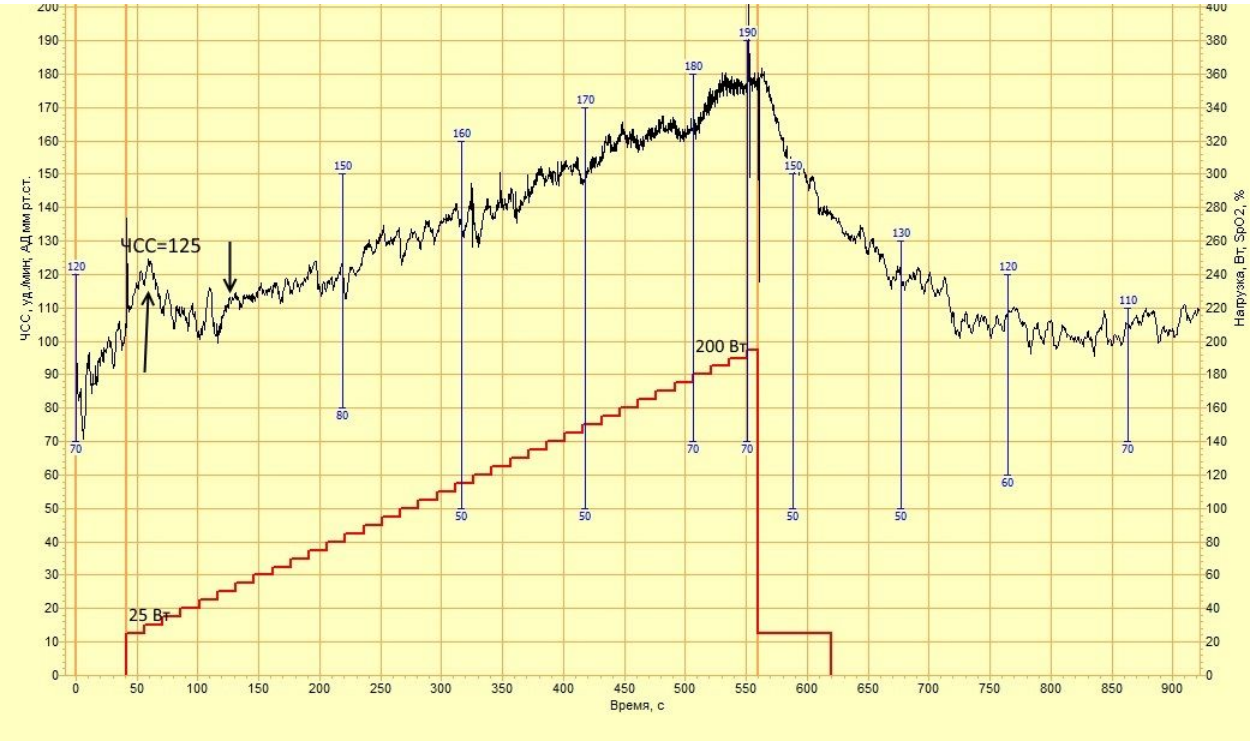

Рис. 3. Ритмограмма нагрузочного теста. Избыточная реакция ЧСС на мягкий ментальный стресс.

I.2.3. Баланс отделов ВНС (соотношение симпатических и парасимпатических влияний) характеризуют:

— отношение LF/HF. Измерение LF и HF проводится в относительных единицах, которые представляют процентный вклад каждой колебательной составляющей в общую мощность спектра, из которой вычитается мощность VLF-компонента, то есть
HF, n. u./LF, n. u.

— ширина «облака» скаттерограммы (w) обусловлена преимущественно высокочастотными колебаниями (эквивалент HF-компонента), а длина (L) в большей степени связана с общей вариативностью сердечного ритма и преимущественно медленными модуляциями, и отражает симпатоадреналовую активность. На рисунке 1 (парасиматикотония) – облако почти в форме круга, на рисунке 2 (симпатикотония) – облако вытянуто вдоль биссектрисы. Соответственно отношение L/w тождественно отношению LF/HF, что позволяет дать характеристику симпато-парасимпатического баланса. Показателем L/w целесообразно пользоваться в тех случаях, когда при записи ВРС регистрируются экстрасистолы.

— индекс напряжения регуляторных систем (ИН) Р. М. Баевского характеризует активность механизмов автономной регуляции, состояние центрального контура регуляции. Этот показатель вычисляется на основании анализа графика распределения кардиоинтервалов гистограммы. Усиление симпатической регуляции проявляется стабилизацией ритма, уменьшением разброса длительностей кардиоинтервалов, увеличением количества однотипных по длительности интервалов (рост амплитуды моды числа интервалов, соответствующих значению моды — наиболее часто встречаемому

значению). Увеличивается амплитуда моды, а основание гистограммы, наоборот, становится узким. Количественно это может быть выражено отношением высоты гистограммы к ее ширине. Показатель крайне чувствителен к малейшим отклонениям длительности RR интервалов от нормального распределения. Даже единичные спонтанные эпизоды удлинения длительности RR приводит к избыточному снижению значений ИН. И наоборот, увеличение ЧСС и уменьшение разброса длительности RR (например, при проведении функциональных проб) непропорционально резко повышает ИН. Как и при других геометрических методах, корректная интерпретация результатов возможна при относительно длинной записи (оптимально от 20 минут).

— очень низкочастотные колебания (very low frequency (VLF)) — диапазон частот от 0,003 до 0,04 Гц (частота колебаний — 0,2–2,4 циклов в минуту). Физиологические факторы, влияющие на них, многочисленны и не всегда могут быть надежно интерпретированы. Предположительно на спектральную мощность в этом диапазоне влияют: ренин-ангиотензин-альдостероновая система, концентрация катехоламинов в плазме, система терморегуляции и другие церебральные эрготропные структуры, а также различные факторы, приводящие к нестационарности процесса записи. Некоторые авторы суммируют значения LF- и VLF-компонента и сумму этих значений считают показателем симпатоадреналовой активности. С подобным подходом можно согласиться лишь в отдельных случаях.

1.3. Характеристику сложности и устойчивости системы можно дать, используя нелинейные методы анализа, такие как «энтропия», «фрактал», «периодические колебания», «бифуркации, «хаос».

Как понимать слова «внутренняя устойчивость системы»? Приведу пример, на первый взгляд, далекий от медицины. Тунис, декабрь 2010 года. У уличного торговца Буазизи конфисковали товар. Предполагается, что это был способ вымогательства взятки. Последующее публичное самосожжение инициировало ряд инцидентов. Итог — серия протестов и демонстраций по всему Ближнему Востоку и Северной Африке, которая стала известна как Арабская весна. По состоянию на май 2012 года революции привели к свержению четырех глав государств. Экономические потери, по данным МВФ, составили более 55 миллиардов долларов, а прямые финансовые убытки — как минимум 75 миллиардов долларов. Описанная выше ситуация — наглядный пример известного представления из теории хаоса: «взмах крыла бабочки на одном конце земного шара может вызвать ураган на другом».

Были ли эти события неожиданными? На первый взгляд — да. Но была ли к этому предрасположенность, готовность? Можно ли было это предсказать? С определенной долей вероятности — несомненно. Так же и с ритмом сердца. Немало случаев внезапной смерти, которые не имели четкой связи с каким-либо заболеванием или генетическим дефектом. При надлежащем мониторировании ВРС в динамике, при наличии соответствующего математического обеспечения можно предсказать вероятность внезапного и резкого отклонения ритма сердца. Подобные математические модели используются рейтинговыми агентствами при принятии решений о целесообразности или риске инвестиций, финансистами для предсказания колебания курса валют.

1.4. Показатели, характеризующие состояние барорефлекторной регуляции

В идеале измерение и оценка барорефлекторных показателей строятся на кросскорреляционных отношениях между частотой сердечных сокращений (интервалами RR) и артериальным давлением в покое или в ответ на воздействие того или иного стимула. Одним из наиболее часто применяемых способов оценки барорефлекторной функции является вычисление угла наклона между изменениями ЧСС и АД. С целью оценки барорефлекторной активности также может быть использован перекрестный спектральный анализ для ЧСС и АД. Повысить точность результата можно путем проведения функциональных проб. По динамике ответа можно судить, насколько

синхронно изменяются показатели ЧСС и АД. С этой целью можно использовать пробу Вальсальвы, пассивный тилт-тест, искусственное создание отрицательного давления в области каротидных синусов, пробу с физической нагрузкой либо фармакологические воздействия путем введения препаратов, быстро повышающих, либо наоборот, быстро понижающих артериальное давление.

II. Кросс-анализ вариабельности ритма сердца и вариабельности длительности дыхательного цикла (ВРС/ВДДЦ) и границы частотных диапазонов спектрального анализа.

Тесная взаимосвязь между функционированием дыхательной и сердечно-сосудистой систем была установлена S. Hales (1677–1761), который первым заметил, что пульс изменяется в зависимости от акта дыхания. В 1847 году фотограф C. Lugwig (1816–1895) записал респираторную синусовую аритмию. Вдох увеличивал частоту сердечных сокращений, выдох замедлял ее. Что же дают нам запись паттерна дыхания (пневмограммы) и расчет кросскорреляционных отношений ВРС/ВДДЦ?

1. Оценка паттерна дыхания способствует более полной клинической характеристике пациентов при психоэмоциональных и психовегетативных нарушениях, когда яркими и почти облигатными являются жалобы на учащенное дыхание, чувство нехватки воздуха, неудовлетворенность вдохом — желание и потребность периодически глубоко вдохнуть – так называемый «тоскливый вдох невротика».

2. Косвенно паттерн дыхания может способствовать диагностике и функциональной оценке ряда других патологических состояний, в первую очередь обструкции бронхолегочной системы, некоторых митохондриальных заболеваний.

3. Корректно, причем в ряде случаев весьма существенно, изменить границы частотных диапазонов, что позволяет правильно оценить баланс отделов ВНС, уточнить количественные значения показателей спектральной мощности.

4. В отдельных случаях, когда электрическая нестабильность миокарда проявляется в виде быстрых изменений длительности RR-интервалов, напоминающих высокочастотные колебания, регистрация дыхания способствует распознаванию патологии.

Сам по себе паттерн одиночного дыхательного цикла и пневмограммы в целом может представлять диагностическую ценность и должен приниматься во внимание как минимум при интерпретации результатов ВРС.

В норме пневмограмма имеет крутое восходящее колено, в верхней части скорость вдоха несколько замедляется, а затем почти без инспираторного плато (без задержки) переходит в нисходящее колено. Скорость выдоха к концу замедляется вплоть до экспираторного плато. Особенности вентиляционного паттерна могут нести важную информацию и должны учитываться при анализе сердечного ритма. К примеру, регулярно регистрируемая «ступенька» на восходящем колене кривой вдоха — свидетельство психоэмоциональных (тревожных) расстройств (рис. 4). С точки зрения психосоматической медицины, это может трактоваться как реакция отторжения (не впустить в себя).

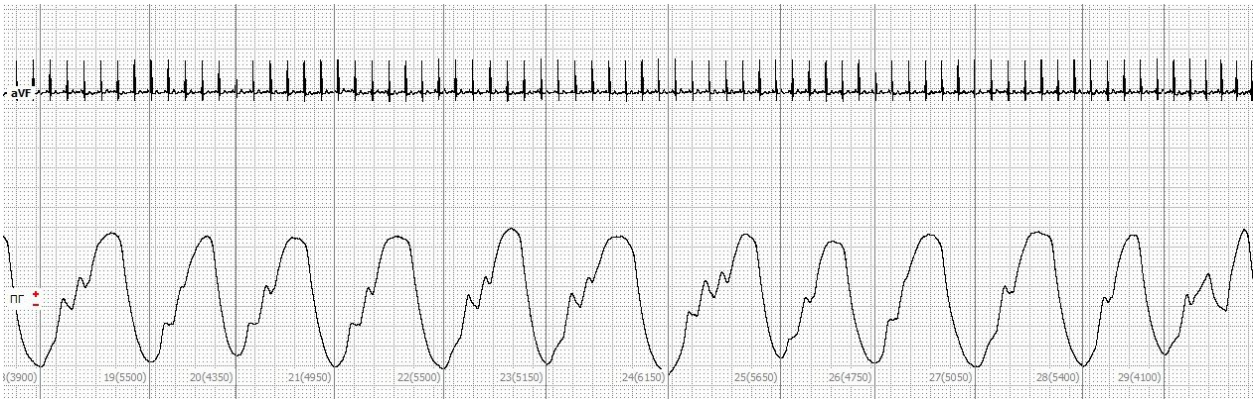

Рис. 4. Паттерн пневмограммы при тревожных расстройствах. На восходящем колене пневмограммы отчетливо видны зазубрины, которые трактуются как «установка блока», нежелание пустить в свой внутренний мир кого-либо или что-либо.

Иногда удается выявить паттерн дыхания, характерный для синдрома обструктивного апноэ во сне (СОАС). Как правило, подобный паттерн дыхания с типичным храпом и эпизодами апноэ регистрируется только при явно выраженном СОАС, когда отчетливо проявляются симптомы хронической усталости (дневная сонливость).

На рис. 5 представлена ритмограмма, на которой периодические одиночные глубокие вдохи сопровождаются учащением ЧСС и хорошо видны периодически возникающие западения. В свое время Э. Фромм очень образно назвал такие вдохи «тоскливыми вдохами невротика». Разумеется, более обоснованным это заключение выглядит в том случае, когда мы не просто визуально наблюдаем влияние особенностей паттерна дыхания на ритмограмму, а имеем зарегистрированную пневмо- и ритмограмму.

Рис. 5. Паттерн кардиоритмограммы, обусловленный «тоскливыми вдохами невротика». Стрелками отмечены изменения ритмограммы, обусловленные глубокими вдохами

Глубокие вдохи значительно увеличивают вариативность сердечного ритма и в частности показатель SDNN, существенно меняются и спектральные характеристики. Искусственно возрастает амплитуда медленных волн, и, как следствие, как бы увеличивается спектральная мощность волн низкой и очень низкой частоты. В результате доля VLF- и LF-компонента в структуре спектральной мощности ВРС становится непропорционально большой. И хотя вывод о преобладании «церебральных эрготропных влияний в модуляции сердечного ритма» в подобной ситуации по сути своей вроде бы правильный, но реального положения дел не отражает. И только синхронная запись пневмограммы либо постоянное наблюдение за пациентом в процессе записи ЭКГ позволяют адекватно интерпретировать результаты и дать обоснованные рекомендации.

Среди способов количественной оценки корреляционных отношений ВРС — ВДДЦ или показателя кардиореспираторной синхронизации (КРС) наибольшее распространение получили:

— анализ во временной области, когда амплитуда колебаний частоты сердечных сокращений анализируется в связи с каждым дыхательным циклом (например, разница между самой быстрой ЧСС во время вдоха и самой медленной ЧСС во время выдоха) (Grossman P. et al., 1990);

— расчет коэффициентов корреляции;

— анализ когерентности спектральной мощности вариабельности ритма сердца и вариабельности длительности дыхательного цикла (Bard L. J. et al., 2001; Widjaja D. et al., 2013);

— методы нелинейной динамики, которые позволяют оценить такие свойства физиологических процессов, как: энтропия, характеризующая уровень информационной неопределенности (устойчивости системы); фрактальность, отражающая степень самоподобия процесса.

Использование при кросс-анализе ВРС — ВДДЦ стандартных статистических коэффициентов корреляции (анализ во временной области) требует предварительного подтверждения «нормальности» распределения обеих выборок, проведения расчета доверительных интервалов коэффициента корреляции и доказательств стационарности процессов, что трудно выполнимо при короткой записи.

Оценка когерентности спектральной мощности (кросскорреляционных отношений ЧСС и ЧД в частотной области) имеет целый ряд преимуществ. Главное из них — спектральные характеристики, позволяющие избирательно анализировать взаимосвязь (когерентность) между длительностью дыхательного цикла и высокочастотным (HF) компонентом ВРС. С точки зрения системного подхода десинхронизация кардиореспираторных отношений является одним из признаков, позволяющих диагностировать состояние дезадаптации (предболезни). В частности, К. В. Судаков (1997, 1998), Е. А. Юматов (1983), исследуя кросскорреляционные отношения ЧСС — ЧД при психоэмоциональном стрессе, обнаружили связь изменений коэффициентов корреляции частоты сердцебиений и дыхания с характером достижения субъектами адаптивных результатов. Высокие кросскорреляционные соотношения ВРС/ВДДЦ наблюдаются у лиц, достигших хороших результатов на производстве, успешно обучающихся в учебных заведениях, у спортсменов, показывающих стабильно высокие результаты. Отдельный вопрос: как сделать кросскорреляционный анализ ВРС/ВДДЦ относительно простым (для пользователя компьютерных программ), понятным для восприятия, предоставляющим максимум информации и в то же время легко применимым на практике?

В 2002 мною был предложен способ оценки функционального состояния человека на основе анализа вариабельности ритма сердца и вариабельности длительности дыхательного цикла (изобретение №2195163 от 27.12.2002). Суть предложенной методики можно представить следующим образом.

Типовой протокол обследования включает 5-минутную синхронную регистрацию ЭКГ и пневмограммы. Определение спектральной мощности в каждом из диапазонов частот проводится в соответствии с Международным стандартом. По пневмограмме строится гистограмма длительности дыхательных циклов, которая графически накладывается на спектрограмму ВРС. В типичном случае получается картина, представленная на рис. 6.

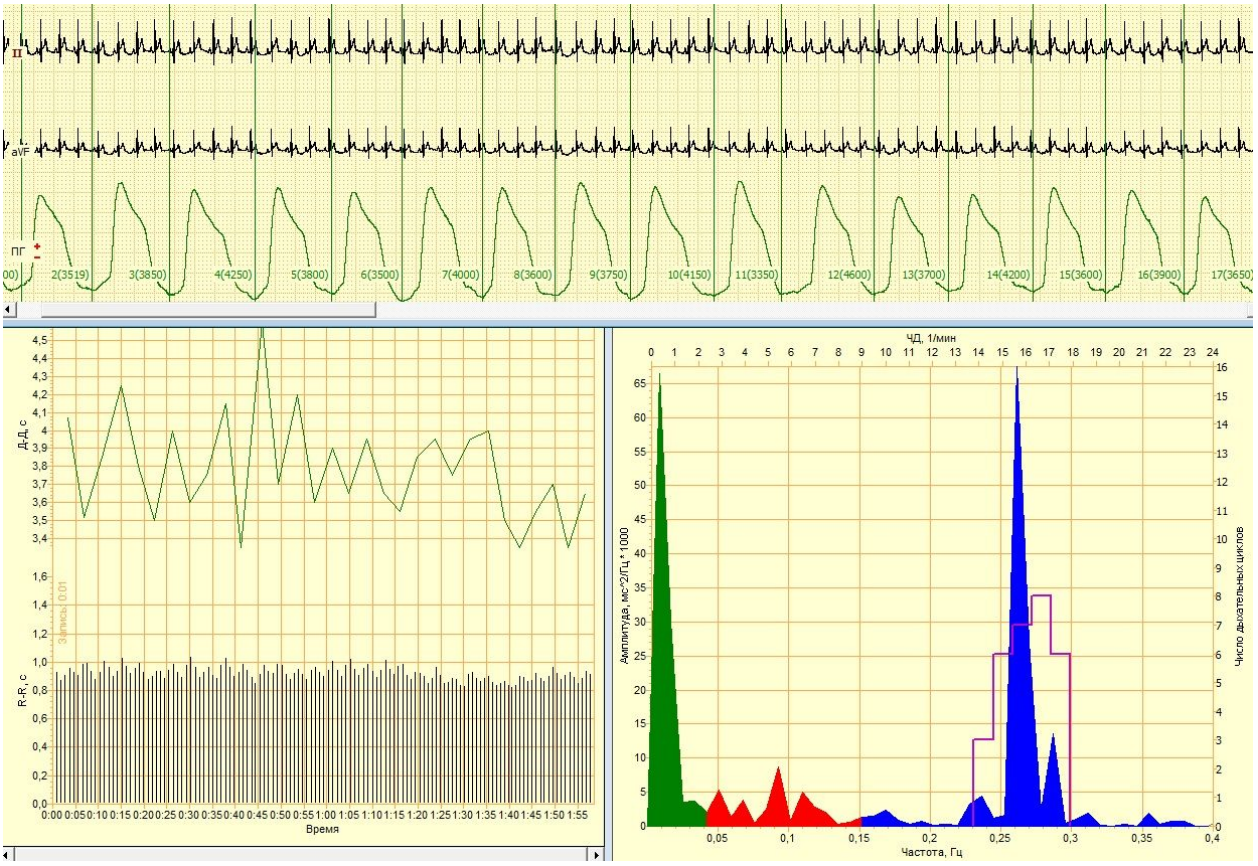

Рис. 6. Последовательность графического построения спектрограммы ВРС и гистограммы ДДЦ:

(А) ЭКГ и запись дыхательных кривых (v = 5 мм/с); (Б) пневмограмма — сверху, ритмограмма — снизу; (В) спектрограмма ВРС с наложенной на нее гистограммой ДДЦ

Основание гистограммы ДДЦ занимает диапазон 0,3–0,38 Гц, что соответствует ЧД равной 18–23 в 1 минуту. В данном случае ширина основания гистограммы ДДЦ совпадает с частотными характеристиками HF-компонента и перерасчета показателей спектральной мощности не требуется. В норме гистограмма ДДЦ должна совпадать с HF-компонентом ВРС.

Анализируются следующие показатели:

— частота дыхания и разброс ВДДЦ;

— параметры спектрального анализа ВРС; при необходимости в HF-компонент вносится поправка с учетом положения гистограммы ДДЦ (в Гц);

— кардиореспираторная синхронизация и/или коэффициент корреляции.

2.1. Определение границ частотных диапазонов в зависимости от частоты дыхания

При разработке Международного стандарта (1996) граница частотного диапазона между HF-компонентом и LF-компонентом была определена по 0,15 Гц, что соответствует частоте дыхания 9 в 1 минуту. Граница была выбрана произвольно, без учета фактической частоты дыхания (длительности дыхательного цикла). Предполагалось, что ЧД в норме не может быть менее 9 в 1 минуту. Но как быть, если частота дыхания окажется менее 9 в 1 минуту? А если при этом принять во внимание, что именно при частоте 6–9 в 1 минуту выраженность синусовой дыхательной аритмии, а следовательно, и вариативность сердечного ритма становятся максимальными? Ответ прост: сдвинуть границу HF-компонента до левой границы гистограммы ДДЦ либо увеличить ЧД > 9 в 1 минуту (рис. 7).

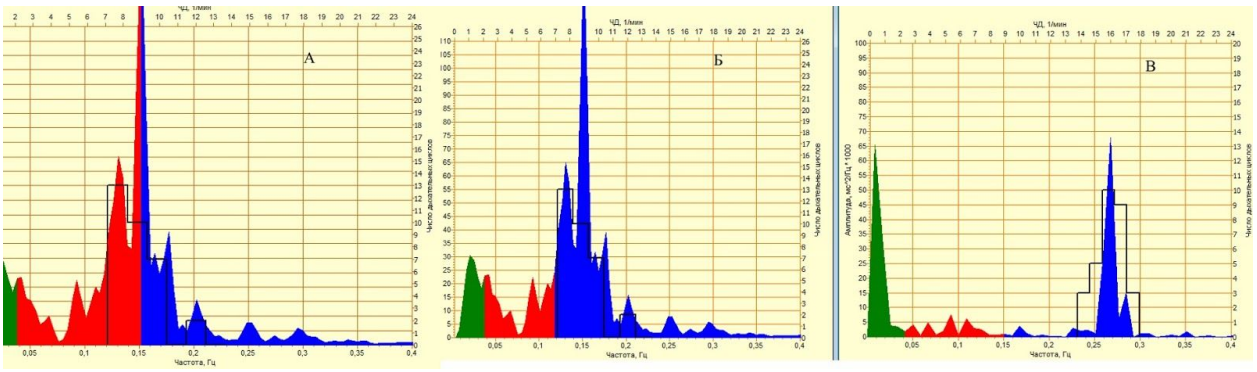

Рис.7. Спектрограмма и гистограмма ДДЦ. Измерение HF-компонента:
(А) ЧД = 9 в 1 минуту; стандартный диапазон измерения — 0,15–0,40 Гц: **TP, мс^2 = 5657;** LF, мс^2 = 3364; HF, мс^2 = 1474; **LF/HF = 2,3**
(Б) ЧД = 9 в 1 минуту; диапазон измерения сдвинут до левого края гистограммы ДДЦ — 0,12–0,20 Гц: **TP, мс^2 = 5651**; LF, мс^2 = 1035; HF, мс^2 = 3926; LF/HF = **0,26**
(В) диапазон измерения в пределах гистограммы ДДЦ на фоне учащенного дыхания (16 в 1 минуту): **TP, мс^2 = 2325**; LF, мс^2 = 319; HF, мс^2 = 1168; LF/HF = **0,27**

Перемещение границы HF-компонента до 0,12 Гц (левая граница гистограммы ДДЦ) привело к существенному изменению показателей симпато-парасимпатического баланса (с 2,3, что соответствует гиперсимпатикотонии, до 0,26 – выраженная парасимпатикотония).

Соответственно менялись формулировки заключения:

(А) Вариант без коррекции (как есть): «Общая мощность спектра нейрогуморальной модуляции — умеренная. Баланс отделов вегетативной нервной системы характеризуется преобладанием активности симпатического отдела. Кардиореспираторная синхронизация сохранена. Текущее функциональное состояние незначительно снижено».

(Б) Вариант после коррекции левой границы HF-компонента (на 0,12 Гц): «Общая мощность спектра нейрогуморальной модуляции — умеренная. Баланс отделов вегетативной нервной системы характеризуется преобладанием активности парасимпатического отдела. Кардиореспираторная синхронизация сохранена. Текущее функциональное состояние удовлетворительное».

(В) Вариант, когда увеличена частота дыхания до 16 в 1 минуту: «Общая мощность спектра нейрогуморальной модуляции — низкая. Баланс отделов вегетативной нервной системы характеризуется преобладанием активности парасимпатического отдела. Кардиореспираторная синхронизация сохранена. Текущее функциональное состояние снижено».

В первом случае (А) снижение текущего функционального состояния (ФС) обусловлено гиперсимпатикотонией. Во втором случае (Б) текущее функциональное состояние расценено как удовлетворительное, но характеристика баланса отделов ВНС поменялась на прямо противоположную, что, собственно, и «улучшило» ФС. И наконец, в третьем случае (В), после увеличения частоты дыхания, баланс отделов ВНС вновь изменился на «преобладание активности парасимпатического отдела», при этом текущее ФС оказалось «сниженным», но на этот раз за счет уменьшения общей мощности спектра нейрогуморальной модуляции.

Где истина? Какое заключение можно расценивать как корректное? Можно предложить примерный алгоритм записи и формирования заключения.

— Фоновую запись необходимо проводить как обычно, не фиксируя внимание пациента на частоте и глубине дыхания.

— Если по исходной записи мы видим, что частота дыхания выходит за пределы установленного стандартного диапазона (менее 0,15 Гц или более 0,4 Гц), то проводим запись с метрономным дыханием (оптимальная частота дыхания — 14–18 в 1 минуту).

— При интерпретации результатов структура спектральной мощности и, соответственно, баланс отделов ВНС рассчитываются по записи с метрономным дыханием.

— Оценку общей мощности спектра (показателя TP) проводим в зависимости от особенностей обычного паттерна дыхания пациента. Если обследуемый дышал медленно и глубоко ради улучшения показателей, то берем в расчет показатель TP при метрономном дыхании. Если это обычный паттерн дыхания пациента, то можно взять значения, полученные при первой записи.

При частоте дыхания более 24 в 1 минуту (больше 0,4 Гц) следует границу расчета HF-компонента расширить до правой границы гистограммы ВДДЦ.

2.2. Кардиореспираторный синхроноз (КРС)

Синхронная работа дыхания и ритма сердца имеет огромное значение в жизни человека. Предлагаемый подход, когда на спектрограмму ВРС накладывается гистограмма вариабельности длительности дыхательного цикла, по своей простоте и информативности не имеет аналогов. Картинка КРС настолько наглядная, что, как правило, не требует особых пояснений и комментариев. На рис. 8 представлен пример хорошо выраженной кардиореспираторной синхронизации слева и практически полного отсутствия КРС справа.

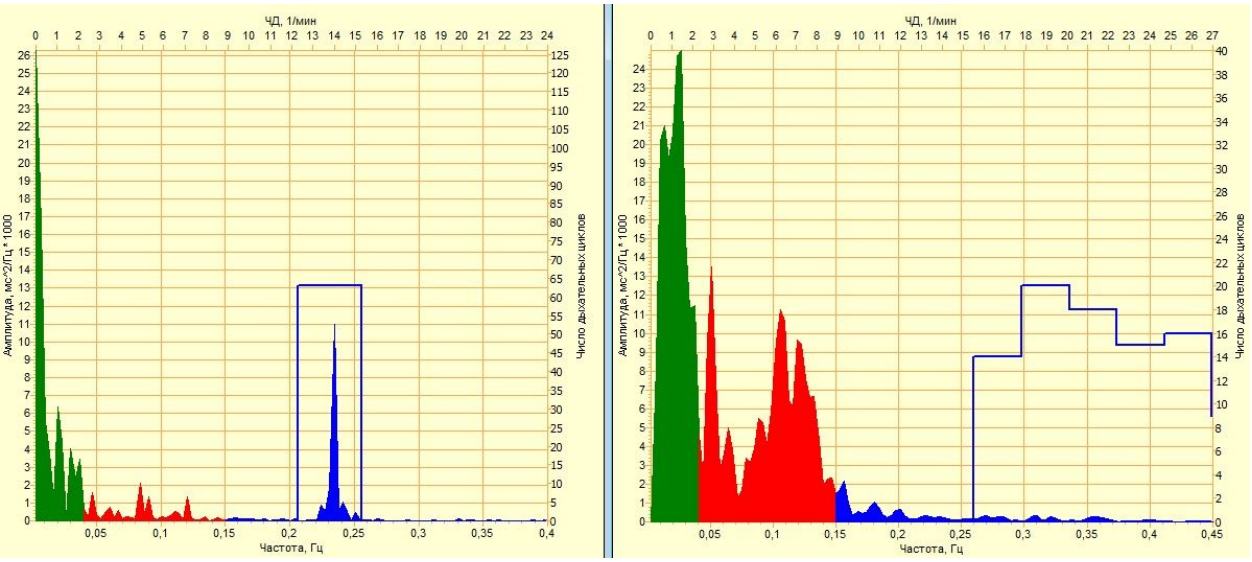

Рис 8. Спектрограмма и гистограмма ВДДЦ: слева — хорошая кардиореспираторная синхронизация (КРС = 51); справа — кардиореспираторный десинхроноз (КРС = 2,6)

Важное замечание. С возрастом при патологии, когда происходит «ускользание» сердечно-сосудистой системы из-под модулирующего влияния вегетативной нервной системы, снижается и кардиореспираторная синхронизация. Соответственно, уменьшается диагностическое значение дыхательных проб.

2.3. Высокочастотные колебания сердечного ритма, не обусловленные дыханием и связанные с электрофизиологической нестабильностью миокарда

В отдельных случаях, как правило, при патологических состояниях, на ритмограмме можно наблюдать высокочастотные колебания (HF-компонент), не связанные с дыханием, а потому они не должны учитываться как HF-компонент при оценке общей спектральной мощности и при расчете баланса отделов ВНС. На ЭКГ эти колебания сердечного ритма выглядят как частые и быстрые изменения длительности RR-интервалов, но не удовлетворяющие критериям экстрасистол. На рисунке 9 представлен пример, который показывает, как кросс-анализ ВРС/ВДДЦ позволяет выявить подобные высокочастотные волны, обусловленные электрофизиологическими особенностями синоатриальной зоны.

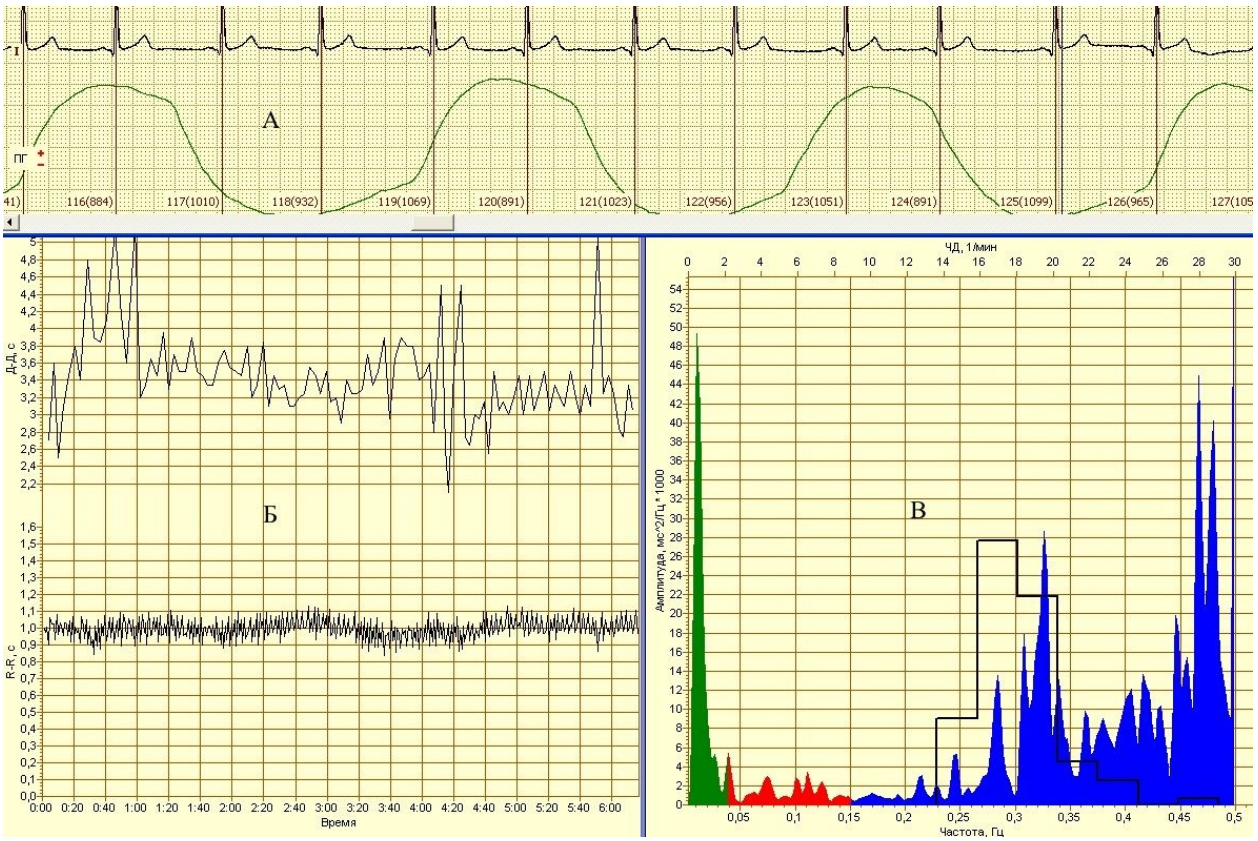

Рис. 9. Спектрограмма при высокочастотных колебаниях. Слева — пик высокочастотных колебаний (0,15–0,25 Гц). При наложении гистограммы ДДЦ пик спектрограммы ВРС не связан с дыханием (ВДДЦ — в диапазоне 0,23–0,40 Гц). Таким образом, представленные высокочастотные колебания не связаны с актом дыхания и, вероятнее всего, отражают электрическую нестабильность синоатриальной зоны. Сверху — пневмограмма и ритмограмма.

При сопоставлении ЭКГ с дыхательной кривой (рис. 9 А) и кардиоритмограммы с пневмограммой (рис. 9 Б) видно, что высокочастотные колебания не зависят от частоты дыхания, а основной пик HF-компонента расположен за пределами гистограммы ВДДЦ. Следовательно, указанные волны не отражают состояние парасимпатического отдела ВНС. В данном случае наиболее вероятный генез кардиореспираторного десинхроноза — электрическая нестабильность в зоне правопредсердного пейсмекерного комплекса.

III. Особенности динамики показателей автономной регуляции при воздействии ментального и физического стресс-стимула

3.1. Динамика показателей ВРС во время тренировки на выживаемость кандидатов в космонавты и парашютной подготовки

Исследование проводилось во время проведения специальной тренировки кандидатов в космонавты.

1-я группа — кандидаты в космонавты во время морской тренировки на выживаемость.

2-я группа — инструкторский состав и кандидаты в космонавты во время специальной парашютной подготовки. При этом для кандидатов в космонавты данный сбор одновременно являлся зачетным.

Основной особенностью представленных исследований являлось то обстоятельство, что все эксперименты были включены в реальный учебно-тренировочный процесс. Дополнительным усиливающим стресс-стимулом и одновременно мотивацией к качественному выполнению заданий служило и то, что практически во всех случаях проходил профессиональный отбор. Такое положение, с одной стороны, вносило

существенные сложности в организацию сбора экспериментального материала, ограничивало набор методических средств и выбор аппаратуры медицинского контроля, а с другой — ликвидировало большинство недостатков лабораторного эксперимента, в первую очередь, низкую мотивацию испытуемых на деятельность.

В 1-й группе исследование выполнялось на тренировочных базах РГНИИ ЦПК им. Ю. А. Гагарина. Качественное проведение кандидатами в космонавты тренировок на выживаемость является обязательным условием для допуска к полетам. Цель морских тренировок — моделирование экстремальных условий автономного существования при внештатном приводнении экипажа в море и формирование у космонавтов профессионально важных качеств.

Материалы и методы: В 1-ю группу включено 12 практически здоровых кандидатов в космонавты, 11 мужчин и 1 женщина (средний возраст — 37,4 ± 5,8 года). Регистрация и оценка показателей ВРС проводились в соответствии с Международным стандартом 1996 года по 5-минутным записям. Дополнительно регистрировалась пневмограмма. Использовался аппаратно-программный комплекс (АПК) «Поли-Спектр-12» производства ООО «Нейрософт» (г.Иваново).

Регистрация электрокардиограммы (ЭКГ) и пневмограммы из капсулы спускаемого аппарата осуществлялась при помощи системы медицинского контроля (СМК) с радиотелеметрической передачей информации «Поли-Спектр-Радио» (ООО «Нейрософт», г. Иваново). Первая запись ритмограммы (РГ) проводилась на борту корабля в отдельной каюте непосредственно перед началом тренировки, вторая — через 5-10 минут после окончания тренировки, при условии наступления стационарности процесса.

В ходе тренировки испытуемые должны были, находясь в капсуле спускаемого аппарата, выполнить ряд заданий. Наиболее значимыми факторами, влияющими на текущее функциональное состояние во время морской тренировки, являются избыточное укачивание, перегревание, дегидратация, гипоксия и гиперкапния. Существенный фактор негативного психоэмоционального модулирования ФС в ходе морской тренировки — эмоции (Филатов Н. А. и др., 2003; Михайлов В. М. и др., 2004; Михайлов В. М. и др., 2006; Михайлов В. М., 2008).

Прыжки с парашютом призваны сформировать у тренируемых навыки работы в условиях психоэмоционального и физического стресса. Регистрация ЭКГ (ритмограммы) и радиотелеметрическая передача информации непосредственно во время спуска проводились с помощью СМК «Поли-Спектр-Радио». Первое обследование проходило утром, до первого прыжка, в положении лежа, а затем стоя выполнялась активная ортостатическая проба (АОП). Повторная запись (лежа и стоя) осуществлялась через 5-15 минут после приземления (после наступления стационарного периода, определяемого визуально по РГ).

Во 2-й группе было обследовано 17 человек в возрасте 30 ± 4 года.

Регистрация и анализ ВРС проводились на АПК «Поли-Спектр-8 (12)» (ООО «Нейрософт») в соответствии с Международным стандартом 1996 года.

На рис. 10 представлены фотографии с проведения натурных испытаний кандидатов в космонавты во время специальной тренировки на море.

Рис. 10 А. Имитация падения капсулы спускаемого аппарата в море.

Рис. 10 Б. Запись ВРС и параметров центральной и церебральной гемодинамики (АПК «Рео-Спектр») через 5-10 минут после окончания тренировки.

Текущее функциональное состояние оценивалось по показателю TP (общая мощность спектра), с учетом вклада быстрых колебаний (HF-компонента), отражающих активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы (ВНС), медленных колебаний (LF-компонента) как маркера активности симпатических влияний и очень медленных колебаний (VLF-компонента), обусловленных в определенной степени гуморально-метаболическими и церебральными эрготропными влияниями. Отношение LF/HF расценивалось как симпато-парасимпатический баланс.

Реактивность парасимпатического отдела ВНС при проведении АОП определялась по коэффициенту 30:15 (К 30:15). Вегетативное обеспечение деятельности оценивалось по степени выраженности активации симпатоадреналовой системы в ответ на ортостаз (принималась во внимание динамика процентного отношения LF/HF, с учетом изменения абсолютных значений LF-компонента).

Дополнительно регистрировалась пневмограмма, определялась длительность дыхательного цикла (ДДЦ), при необходимости граница HF-компонента корректировалась с учетом ширины и положения на оси абсцисс основания гистограммы ДДЦ. Результаты исследования обрабатывались с помощью статистических пакетов программ Microsoft Excel 7 и Biostat 3.03. Данные представлены в виде медианы и 25-й и 75-й процентилей (Me (25%; 75%)). Достоверность различий оценивалась по непараметрическому критерию Уилкоксона.

Результаты обследования кандидатов в космонавты до и после морской тренировки

Результаты математического анализа ВРС до и после морской тренировки кандидатов в космонавты приведены в табл. 1. Как видно из данных, представленных в табл. 1, после проведения морской тренировки в покое достоверно снизилась вариативность сердечного ритма: снизилась общая мощность спектра (TP) за счет VLF- и HF-компонентов, снизился показатель SDNN. В структуре спектральной мощности достоверно снизился показатель HF (%) и временные показатели, характеризующие парасимпатическую активность (RMSSD, pNN50 (%)). На этом фоне относительно увеличился вклад медленной составляющей (абсолютные значения спектральной мощности LF-компонента не изменились), что отражает относительное повышение активности симпатоадреналовой системы.

В результате достоверно увеличилось отношение LF/HF, характеризующее симпато-парасимпатический баланс. Интерпретировать вышеперечисленные сдвиги можно следующим образом: после проведения морской тренировки наблюдаются снижение текущего функционального состояния преимущественно за счет парасимпатического отдела ВНС и относительное возрастание симпатоадреналовой активности. Прошу обратить особое внимание: возрастание симпатоадреналовой активности — не абсолютное, а относительное.

Таблица 1. Показатели ВРС до и после морской тренировки (фоновая запись и АОП)

Показатель	**фоновая запись**		**АОП**	
	до	**после**	**до**	**После**
RRNN, мс	948 (846; 1034)	694 (625; 747)***	754 (707; 878)	585 (516; 616)***
SDNN, мс	54.0 (40.7; 64.3)	27.0 (23.5; 43.8)*	47.5 (42.3; 51.5)	27.0 (23.5; 32.0)**
RMSSD,мс	42.0 (28.0; 50.8)	27.0 (23.5; 43.8)*	20.5 (17.0; 25.8)	12.0 (7.5; 13.0)***
pNN50, %	21.6 (6.0; 30.1)	0.49 (0.00; 3.02)*	2.68 (1.25; 4.80)	0.53 (0.00; 1.05)**
TP, мс^2/Гц	2775 (1717; 4080)	655 (475; 1659)*	2234 (1781; 3291)	677 (489; 957)**
VLF,мс^2/Гц	934 (614; 1540)	302 (222; 610)*	852 (675; 1424)	240 (192; 344)**

LF, мс^2/Гц	683 (380; 987)	318 (177; 785)н	982 (587; 1636)	472 (201; 551)**
HF, мс^2/Гц	583 (371; 1234)	38 (34; 89)*	123 (69; 272)	14 (8; 33)***
LF/HF	1.8 (0.6; 2.7)	8.4 (4.8; 8.9)***	8.3 (4.1; 16.0)	23.2 (16.6; 25.1)**
% VLF	39.9 (26.9; 48.1)	43.4 (35.0; 49.7) н	38.9 (31.3; 51.3)	46.1 (33.3; 57.3)н
% LF	34.2 (18.1; 45.6)	47.3 (35.0; 52.8) **	42.8 (30.7; 61.9)	50.7 (41.1; 60.5)н
% HF	22.8 (15.0; 34.4)	6.1 (5.6; 9.1)***	5.6 (3.4; 10.7)	2.1 (1.5; 3.5)**
К30:15			1.54 (1.36; 1.79)	1.15 (1.10; 1.21)***

*н — недостоверно; * — (p<0.05); ** — (p<0.01); *** — (p<0.001).*

Еще более отчетливо перечисленные выше сдвиги выявляются при проведении активной ортостатической пробы. Достоверно снижается общая мощность спектра, в первую очередь за счет высокочастотного компонента. На этом фоне относительно возрастает симпатоадреналовая активность и, что важно, с высокой степенью достоверности снижается реактивность парасимпатического отдела ВНС (К 30:15).

В наглядной форме динамика показателей ВРС представлена на рис.11.

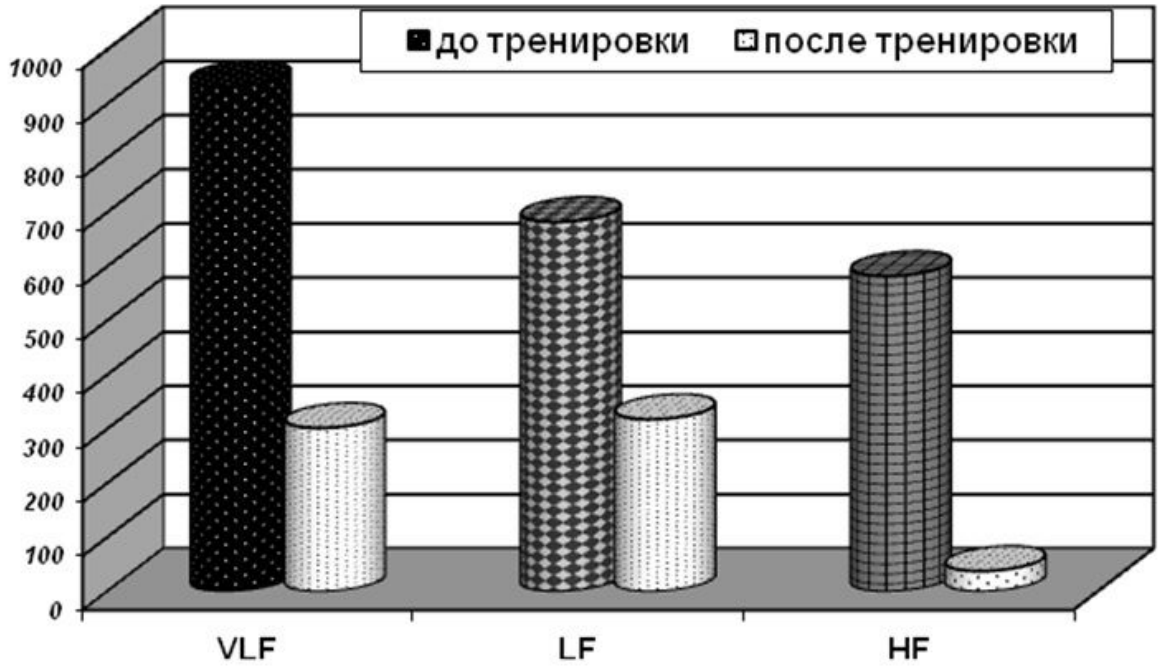

Рис.11. Показатели спектральной мощности ВРС (медиана) до и после проведения морской тренировки на выживаемость

Показатель LF/HF отражает баланс симпатического и парасимпатического отделов ВНС, показатель К 30:15 характеризует реактивность парасимпатического отдела ВНС при проведении АОП. Снижение К 30:15 не просто отражает сниженную реактивность парасимпатического отдела ВНС, а указывает на поломку возвращающих к норме механизмов. Низкие значения К 30:15 наряду с подавлением парасимпатической активности (HF-компонента) — маркер низкой устойчивости блуждающего нерва к воздействию стресс-стимула.

Рост отношения LF/HF отражает адекватность вегетативного обеспечения деятельности. В норме при хорошей стрессоустойчивости и относительно невысокой интенсивности стресс-стимула должна увеличиваться симпатоадреналовая активность. Недостаточный прирост свидетельствует об истощении адаптационного потенциала. Однако пределы физиологических колебаний этих показателей в настоящее время надежно не определены, и, по-видимому, необходимо отрабатывать внутригрупповые нормы при решении каждой конкретной задачи.

Приведенные выше доводы согласуются и в какой-то степени объясняют представления Г. Селье о поверхностной адаптационной энергии.

Если отбросить мистические представления, то вполне очевидно, что истощение поверхностной адаптационной энергии — это снижение регуляторных возможностей вегетативной нервной системы. При этом в первую очередь быстрее истощается парасимпатический отдел ВНС — система быстрого реагирования. При длительном стрессе в процесс вовлекается глубокая адаптационная энергия, которая отождествляется с гуморальной системой регуляции (ось «гипофиз — надпочечники»), далее иммунная система, и в последующем развиваются структурные изменения органов и систем.

Результаты обследования парашютистов до и после прыжка

Непрерывная передача ЭКГ во время прыжка обеспечивалась с помощью СМК «Поли-Спектр-Радио» производства ООО «Нейрософт» (г. Иваново). Непосредственно во время спуска средняя частота сердечных сокращений (ЧСС) составила 160 ± 20,3 уд/мин. Пример ритмограммы и фрагмент ЭКГ с зарегистрированной экстрасистолией во время спуска и в первые минуты после приземления представлены на рис.12 .

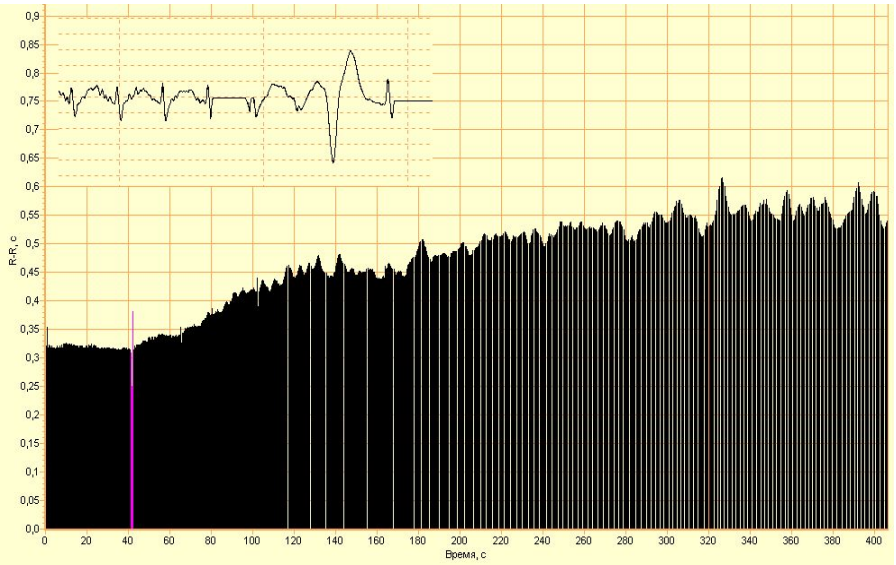

Рис. 12. Фрагмент ЭКГ, политопные групповые экстрасистолы (в левом верхнем углу) и ритмограмма во время спуска и в первые минуты после прыжка.

ЧСС к моменту приземления — 180 уд/мин. На 40-й секунде (непосредственно перед касанием с землей) отмечаются групповые экстрасистолы. Сразу после приземления наблюдается урежение ЧСС. Примерно через 300 секунд ЧСС снизилась до 110 уд/мин, появилась хорошо выраженная волновая структура сердечного ритма, процесс принял стационарный характер. После приземления стационарность волнового процесса сердечного ритма, как правило, восстанавливалась в течение 5-10 минут практически до исходного уровня. Средняя ЧСС до прыжка составляла 72 ± 13,7 уд/мин, через 5-10 минут после прыжка во время регистрации ВРС — 80,1 ± 14,9 уд/мин.

Восстановление волновой структуры сердечного ритма — важная качественная характеристика. С этого времени модуляция сердечного ритма находится под контролем ВНС и, следовательно, в состоянии адекватно реагировать на меняющиеся внешние воздействия. Время восстановления волновой структуры сердечного ритма после

воздействия стресс-стимула — важная характеристика оценки адаптационных резервов организма, особенно в физиологии труда таких профессиональных групп, чья деятельность связана с высокой степенью риска.
Результаты математического анализа ВРС до и после прыжка с парашютом представлены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели ВРС до и после прыжка с парашютом (фоновая запись и АОП)

Показатель	**фоновая запись**		**АОП**	
	до прыжка	**после**	**до прыжка**	**после**
RRNN, мс	885 (762; 915)	769 (693; 903)**	702 (637; 760)	639 (592; 674)**
SDNN, мс	69.5 (47.0; 90.3)	38.0 (26.3; 48.0)***	55.0 (28.0; 61.5)	35.5 (29.5; 46.8)*
RMSSD, мс	48.0 (27.8; 82.5)	21.0 (11.5; 32.5)***	25.0 (10.0; 32.5)	17.0 (10.8; 23.0)**
pNN50, %	21.2 (7.1; 47.4)	3.6 (0.3; 12.4)***	5.0 (0.4; 7.8)	2.2 (0.3; 3.5)**
TP, мс^2/Гц	5189 (3000; 6928)	1791 (873; 3169)***	3730 (1240; 5652)	1925 (1361; 3161)**
VLF,мс^2/Гц	1509 (876; 2723)	734 (559; 1285)**	1160 (523; 2125)	763 (419; 923)н
LF, мс^2/Гц	1176 (841; 1750)	688 (283; 863)**	1446 (613; 3468)	1144 (590; 2098)н
HF, мс^2/Гц	1752 (643; 2753)	239 (116; 558)***	280 (135; 743)	146 (90; 428)*
LF/HF	0.8 (0.4; 1.1)	2.0 (1.4; 3.0)***	5.5 (3.7; 7.4)	6.4 (5.0; 9.0)н
% VLF	37.6 (26.0; 53.3)	49.3 (34.9;57.9)н	36.5 (29.7; 53.9)	40.1 (24.1; 48.1)н
% LF	22.2 (18.3; 33.2)	33.1 (25.6; 40.3)н	54.4 (37.4; 61.4)	52.2 (44.9; 65.1)н
% HF	32.8 (20.2; 48.3)	16.9 (13.0; 23.0)**	8.5 (6.6; 14.3)	8.9 (5.5; 12.0)н
К30:15			1.35 (1.26; 1.52)	1.20 (1.09; 1.27)**

*н — недостоверно; * — (p<0.05); ** — (p<0.01); *** — (p<0.001).*

При анализе полученных данных наблюдается та же динамика показателей ВРС, как и у кандидатов в космонавты после морской тренировки. После прыжка с парашютом снижается общая вариативность сердечного ритма (снижение показателей TP, SDNN), наблюдается выраженное угнетение активности и реактивности парасимпатического отдела ВНС (снижение показателей RMSSD, pNN50 (%)), мощности HF-компонента в покое, К 30:15 и удельного вклада высокочастотного компонента (HF) в ответ на ортостаз. На этом фоне отмечается относительное увеличение активности симпатоадреналовой системы (возрастает отношение LF/HF).

3.2. Динамика показателей ВРС при воздействии физического стресс-стимула

Динамика ВРС после физической тренировки (воздействие преимущественно физического стресс-стимула) существенно отличается от динамики показателей при воздействии психоэмоционального (ментального) стресса. В качестве примера приведу результаты обследования хоккеистов, кандидатов в юношескую сборную страны, проходящих тренировочный сбор перед поездкой на чемпионат мира. Тренировки

проходили дважды в день, утром и вечером. Исследование ВРС проводилось также дважды в день: утром, до подъема, и вечером, через 2-2.5 часа после тренировки (перед сном). Динамика показателей спектрального анализа ВРС у подростков-хоккеистов, записанных в положении лежа, представлена в таблице 3 и на рис. 13, 14.

Таблица 3. Показатели ВРС до и после тренировки хоккеистов (фоновая запись и АОП)

Показатель	фоновая запись		АОП	
	до тренировки	После	до тренировки	После
RRNN, мс	1025 (946; 1202)	906 (852; 933)*	755 (654; 821)	754 (738; 781)н
SDNN, мс	94.0 (46.5; 135.5)	47.0 (39.3; 66.1)***	71.0 (60.0; 109.5)	65.5 (56.2; 94.8)н
RMSSD, мс	91.0 (37.5; 150.0)	52.2 (36.5; 59.5)**	33.0 (23.0; 61.5)	38.1 (32.8; 55.0)н
pNN50, %	51.6 (18.6; 63.2)	33.9 (14.2; 49.8)*	10.0 (3.4; 23.3)	13.7 (10.5; 26.1)*
TP, мс^2/Гц	8743 (2104; 18001)	2072 (1427; 3641)***	4746 (2898; 9868)	3928 (2885; 8740)**
VLF,мс^2/Гц	2492 (989; 6369)	536 (439; 627)**	1621 (905; 3549)	1144 (948; 1851) н
LF, мс^2/Гц	1422 (696; 5231)	516 (452; 1397)***	2165 (1617; 4860)	2119 (1358; 4698)н
HF, мс^2/Гц	2903 (567; 8054)	840 (648; 1616)***	257 (100; 1070)	383 (365; 779)н
LF/HF	0.94 (0.69; 1.21)	0.75 (0.63; 0.86)н	9.0 (3.8; 10.4)	5.6 (2.4; 7.5) *
К30:15			1.7 (1.4; 1.9)	1.62 (1.40; 1.77)н

^{н} — недостоверно; * — ($p<0.05$); ** — ($p<0.01$); *** — ($p<0.001$).

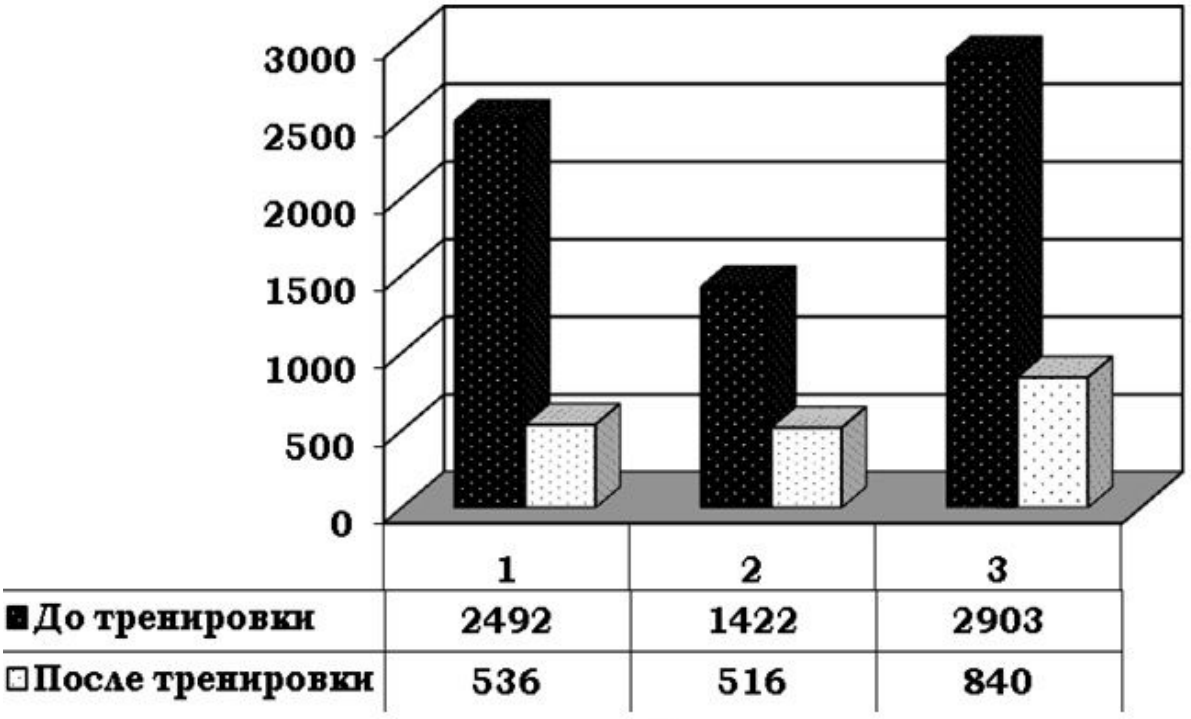

Рис. 13. Сравнительная оценка показателей спектрального анализа у хоккеистов до и после тренировки (фоновая запись в покое, лежа) (1 – VLF; 2 – LF; 3 – HF (мс^2/Гц)).

Как видно из представленных данных, после тренировки резко снизились спектральная мощность всех компонентов и, как следствие, более чем в 4 раза уменьшилась общая

мощность спектра (TP). Таким образом, можно говорить о значительном снижении уровня текущего функционального состояния. Но обратите внимание: в данной группе обследуемых нет существенной динамики соотношения LF/HF. Ещё раз напомню объяснение этому феномену: при интенсивной физической нагрузке увеличение симпатоадреналовой активности обусловлено преимущественно выбросом катехоламинов («работает» ось гипофиз – надпочечники). При стресс-нагрузках меньшей интенсивности, но с большим вкладом психоэмоционального компонента, активация симпатоадреналовой активности происходит преимущественно за счет выброса норадреналина симпатической нервной системы и, как следствие, наблюдается более значительный прирост отношения LF/HF. В то время как выброс гормонов надпочечников оказывает в значительной степени стабилизирующее действие на миокарда, выброс норадреналина при психоэмоциональном стрессе приводит к электрической дефрагментации миокарда и может спровоцировать возникновение аритмий. Этим и объясняется тот факт, что психологический стресс в итоге оказывает отрицательное влияние на организм человека, а физический стресс умеренной интенсивности приносит пользу.

Динамика показателей спектрального анализа при проведении активной ортостатической пробы до и после тренировки представлена на рис. 14.

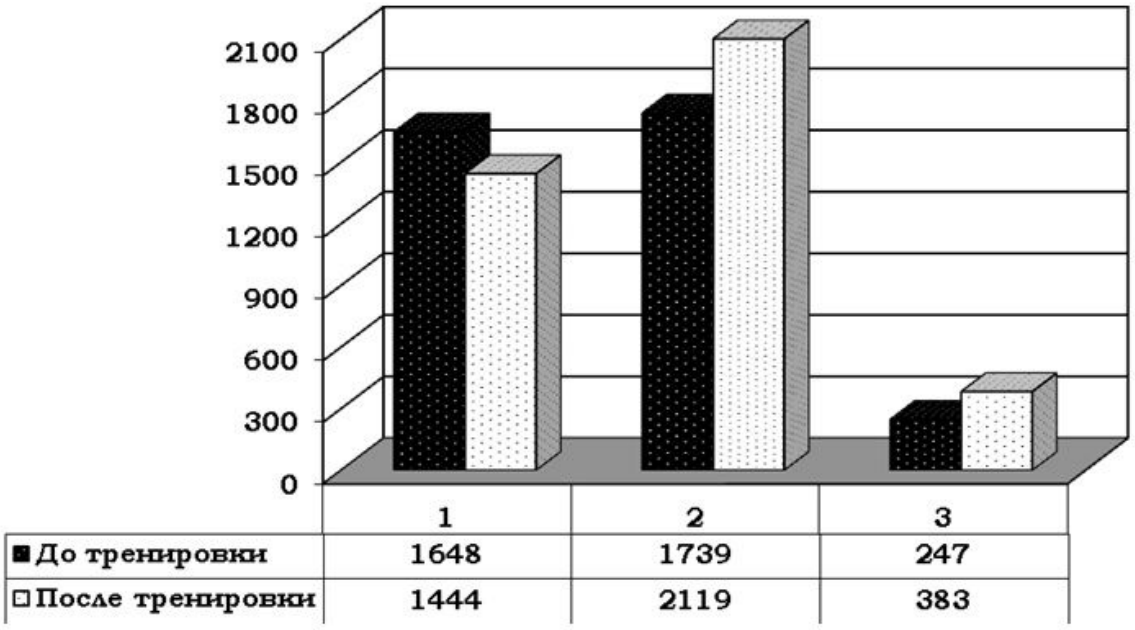

Рис. 14. Показатели спектрального анализа ВРС у хоккеистов до и после тренировки во время проведения АОП (1 – VLF; 2 – LF; 3 – HF (мс^2/Гц)).

В отличие от фоновой записи, при проведении АОП динамика показателей спектрального анализа (до и после тренировки) недостоверна, что следует трактовать как сохранность адаптационных резервов организма на фоне снижения текущего ФС.

Степень выраженности снижения показателей спектральной мощности в покое отражает так называемую физиологическую цену деятельности, в данном случае – физиологическую цену тренировки. Диагностическая ценность подобных исследований заключается в том, что они позволяют при повторных регистрациях оценить, насколько снизились или насколько полно восстановились текущее функциональное состояние и адаптационные резервы организма. В условиях больших по объему и интенсивности тренировочных нагрузок оценка текущего ФС организма дает возможность правильно вести тренировочный процесс, предупредить переход адаптационных изменений за границы целесообразного приспособления. Отсутствие восстановления показателей спектральной мощности ВРС на следующий день после тренировки, избыточное

нарастание симпатико-адреналовой активности и недостаточная реактивность парасимпатического отдела ВНС при проведении активной ортостатической пробы, определяемые по коэффициенту 30:15, позволяют осуществлять раннюю диагностику таких состояний, как утомление и перетренированность.

IV. Выводы и заключение:

В ответ на действие стрессогенного фактора возникают адаптивные системные реакции, которые носят компенсаторный характер. Наряду с системами, специфически ответственными за адаптацию к данным повреждениям, важную роль играет система нейрогуморальной регуляции как неспецифическая система адаптации к воздействию стрессогенного фактора. У практически здоровых лиц, подвергшихся воздействию стрессогенного фактора, на первый план выступает неспецифическая система адаптации (система нейрогуморальной регуляции), которая может быть адекватно оценена при исследовании ВРС.

Сравнение групп обследуемых (а) с преимущественным воздействием психоэмоционального компонента (кандидаты в космонавты во время тренировки на выживаемость, парашютисты во время и после прыжков) и (б) с преимущественным воздействием физического компонента (хоккеисты) позволило установить типичную динамику показателей ВРС под воздействием стресс-стимула:

— Вариативность сердечного ритма (показатели: общая мощность спектра (TP), стандартное отклонение (SDNN), площадь «облака» на скаттерограмме (S)) снижается.

— Парасимпатические влияния (показатели: спектральная мощность HF-компонента, pNN50 (%), rMSSD, ширина «облака» на каттерограмме (w)) снижаются.

— Показатели, характеризующие активность симпатоадреналовой системы (спектральная мощность LF-компонента, длина «облака» на скаттерограмме (L)), также снижаются, но в меньшей степени.

— Как следствие, баланс отделов ВНС относительно сдвинут в сторону симпатоадреналовой активности (показатели: LF/HF, L/w).

— Абсолютная спектральная мощность волн очень медленного периода (VLF-компонент) существенно не меняется, и они становятся доминирующими в структуре спектральной мощности.

— При проведении активной ортостатической пробы достоверно снижается коэффициент 30:15 — поломка возвращающих к норме механизмов. Снижение К 30:15 и спектральной мощности HF-компонента указывает на преимущественное поражение парасимпатического отдела ВНС при стрессе.

Снижение текущего функционального состояния (вариативности сердечного ритма), снижение активности (тонуса) парасимпатического отдела ВНС, относительная активация симпатоадреналовой системы являются патогенетической основой развития реакций дезадаптации.

При записи пневмограммы выявляется нарушение кардиореспираторной синхронизации, что также следует рассматривать как характерный признак дистресса. Приведенная выше динамика ВРС в ответ на стресс-стимул в большей степени характерна для группы с преимущественным воздействием психоэмоционального компонента. Что касается группы с преимущественным воздействием физического компонента, подавление парасимпатических влияний выражено в меньшей степени, чаще наблюдается не только относительное, но и абсолютное увеличение симпатоадреналовой активности.

Это наблюдение подтверждает наличие принципиальной разницы между физическим и эмоциональным стрессом. При физических нагрузках активация симпатоадреналовой системы сопровождается преимущественно выбросом адреналина — гуморальный канал. Равномерное воздействие адреналина на бета-рецепторы сердца через кровь не вызывает электрической дефрагментации миокарда и даже оказывает стабилизирующее действие.

При психоэмоциональном воздействии активация симпатоадреналовой системы обеспечивается в большей степени за счет выброса норадреналина — нейрогенный канал. Преимущественное модулирующее влияние норадреналина (нейрогенный канал) при определенных условиях (снижение аффинности и плотности бета-рецепторов сердца в результате апоптоза, рубцовых изменений миокарда, нейродегенеративных процессов) может оказаться потенциально опасным, так как приводит к электрической дефрагментации миокарда. Подавление парасимпатической активности дополнительно повышает риск.

— Регистрация ВРС в режиме онлайн в ходе проведения натурных испытаний позволяет дать количественную характеристику такому понятию, как «физиологическая цена деятельности», при необходимости своевременно корректировать интенсивность тренировочного и рабочего процессов и таким образом на практике реализовать положения и концепции сохранения профессионального здоровья при экстремальных видах деятельности.

Список использованных источников

1. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука; 1984: 220.
2. Баевский Р.М. Теоретические и прикладные аспекты оценки и прогнозирования функционального состояния организма при действии факторов длительного космического полета. Актовая речь на заседании Ученого совета ИМБП. 2005 г.
3. Баевский Р.М. Научно-теоретические основы использования анализа вариабельности сердечного ритма для оценки степени напряжения регуляторных систем организма . Тез. Междунар. симп. "Компьютерная электрокардиография на рубеже столетий XX - XXI". Москва, 1999. С. 116.
4. Бройтигам В., Кристиан П., Рад М. Психосоматическая медицина: Кратк. учебн. М.: ГЭОТАР МЕДИЦИНА; 1999: 376.
5. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине. М.: Сов. радио; 1968: 326.
6. Водопьянова Н.Е. Психодиагностика стресса. – СПб.: Питер, 2009. – 336 с.
7. Генкин А.А., Медведев В.И. Прогнозирование психофизиологических состояний. Л.: Наука; 1973: 43.
8. Михайлов В. М. Медицинские технологии и приборы трехуровневого измерения здоровья и оценки индивидуального риска. \\ Материалы четвертой международной конференции «Донозология - 2008. Методологические и методические проблемы изучения донозологического статуса в экстремальных условиях.» Под общей редакцией дмн. проф. Захарченко М.П., дмн. проф. Щербука Ю.А. Санкт-Петербург, 2008 г. с. 55–58.
9. Михайлов В.М. Способ оценки функционального состояния человека на основе анализа вариабельности ритма сердца и вариабельности длительного дыхательного цикла. Патент на изобретение №2195163 (2001102688) Российской Федерации. МПК А 61 В 17/00. от 27.12.2002г.
10. Михайлов В.М., Филатов Н.А., Смирнов Н.А. Количественная оценка текущего функционального состояния при стрессе. Функциональная диагностика. 2004;1:40 – 45.
11. Михайлов В.М., Похачевский А.Л., Похачевская Э.В. Количественная оценка текущего функционального состояния при стрессе. Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2006; 1: 19–21.

12. Михайлов В.М., Харламова Н.В., Беликова М.Э.. Показатель вариабельности сердечного ритма pNNx у новорожденных. Функциональная диагностика. 2006;1:19-22.

13. Михайлов В.М., Филатов Н.А., Смирнов Н.А. Количественная оценка текущего функционального состояния при стрессе. Функциональная диагностика. 2004;1:40 – 45.

14. Михайлов В.М., Филькина О.М., Шанина Т.Г. Пределы физиологической нормы параметров вариабельности сердечного ритма здоровых подростков 14–16 лет в зависимости от пола и уровня тренированности. Ультразвуковая и функциональная диагностика.2009;3:67-73.

15. Михайлов В.М. Многоуровневый подход в оценке здоровья здорового человека и прогнозирования индивидуального риска. ООО "Нейрософт" (репринтное издание). г. Иваново.2010. 166с.

16. Парин В.В., Баевский Р.М. Кибернетика в медицине и физиологии. М.: Медгиз; 1963: 117.

17. Проблемы космической биологии, т. XXVI. Воскресенский А.Д., Вентцель М.Д. Статистический анализ сердечного ритма и показателей гемодинамики в физиологических исследованиях. Изд. «Наука»; 1974: 221.

18. Судаков К.В. Индивидуальная устойчивость к эмоциональному стрессу. М.; 1998: 267.

19. Судаков К.В., Тараканов О.П., Юматов Е.А. Кросс-корреляционный вегетативный критерий эмоционального стресса. Физиология человека.1995;21:3:87-95.

20. Ульмер Х.Ф. Энергетический баланс. Работа и влияние окружающей среды. // Физиология человека. В 3-х т. Т.3. Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996 – с.698.

21. Филатов Н.А., Михайлов В.М., Смирнов Н.А. Количественная оценка функционального состояния при стрессе в процессе морской тренировки // V Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космосе», Звездный городок, Московская обл., РФ. 9–10 апреля 2003 г.; 336–338.

22. Day T.A. Defining stress as a prelude to mapping its neurocircuitry: No help from allostasis. Prog Neuro-Psychopharm Biol Psych. 2005;29:1195-1200.

23. Task Force of the European of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart Rate Variability. Standarts of Measurements, Physiological Interpretation, and Clinical Use. Circulation. 1996; 93: 1043–1065.