

УДК 612.-014

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА И ФРАКТАЛЬНОЙ НЕЙРОДИНАМИКИ В УСЛОВИЯХ УПРАВЛЯЕМОГО ДЫХАНИЯ НА ЧАСТОТЕ КОЛЕБАНИЙ СПЕКТРА СЕРДЕЧНОГО РИТМА

Чуян Е.Н., Бирюкова Е.А., Раваева М.Ю., Янцев А.В., Заячникова Т.В.

*Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Украина,
e-mail: Elena-chuyan@rambler.ru*

Изучены изменения показателей variability сердечного ритма и фрактальной нейродинамики в условиях управляемого дыхания на частоте колебаний спектра сердечного ритма. Показано, что управляемое дыхание, частота которого соответствует частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне является мощным механизмом управления сердечным ритмом и изменением функционального состояния организма в целом. Изучение свойств собственных колебательных процессов системы вегетативного управления ритмом сердца возможно на основе эффекта резонанса в спектре сердечного ритма при воздействии управляемого дыхания с частотой, соответствующей частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне.

Ключевые слова: управляемое дыхание, variability сердечного ритма, фрактальная нейродинамика, система вегетативного управления ритмом сердца.

ВВЕДЕНИЕ

Особый интерес в последние годы вызывает исследование синхронизации биологических ритмов в живых организмах, жизнедеятельность которых обусловлена взаимодействием большого числа сложных ритмических процессов [1-3]. Ярким примером такого взаимодействия между различными физиологическими ритмами является функционирование сердечно-сосудистой системы (ССС) человека. Наиболее значимыми колебательными процессами, определяющими ее динамику, являются основной сердечный ритм (СР), дыхание, а также процессы медленной регуляции СР и кровяного давления с собственной частотой вблизи 0.1 Гц [4]. Однако большинство физиологических колебаний не являются строго периодическими, обычно ритмы нерегулярно изменяются с течением времени под действием изменяющихся внешних факторов и шумовых возмущений [2]. Сердечный ритм – не исключение. Механизм регуляции ССС, опосредуемый влияниями вегетативной нервной системы (ВНС), модулируется множеством различных внешних влияний (дыханием, физической нагрузкой, изменением положения тела, психоэмоциональной сферы и т.д.) [2]. В результате взаимодействия эти ритмы проявляются в различных сигналах: электрокардиограмме (ЭКГ),

кровенном давлении, потоке крови, вариабельности сердечного ритма (ВСР)[5].

Сравнительно недавно было обнаружено, что основные ритмы ССС могут быть синхронизованы между собой [6-9], что соответствует современным представлениям о функционировании сложных систем [2]. Причем, было установлено, что систему, задающую основной СР, или систему вегетативного управления сердцем (СВУС), можно рассматривать как автогенератор под внешним воздействием, в качестве которого выступает дыхание [9, 10]. В связи с этим, применение управляемого дыхания (УД) можно расценивать как введение периодической компоненты во внешний шумовой сигнал, поступающий в СВУС.

Согласно современным представлениям об организации СВУС, данная система характеризуется наличием в ней основного автоколебательного процесса на частоте в области 0,1 Гц (низкочастотный диапазон спектра) [11 – 15]. Принято считать, что этот колебательный процесс, изменяющийся под действием внешних факторов и определяющий динамику вегетативного статуса организма, характеризует основные свойства центрального звена СВУС [11; 16 – 20]. В частности, доказано существование синхронизации между дыханием и ритмом регуляции сосудистого тонуса на частоте 0,1 Гц [21]. Поэтому выбор частоты дыхательного возмущения часто проводят согласно Де Бюер-модели, когда наличие собственных колебаний системы с частотой 0,1 Гц позволяет использовать резонансный отклик в низкочастотном (LF) диапазоне колебаний СР с периодом 10 секунд [11 – 14]. Эффект резонанса в данном случае обусловлен физическим совпадением частот двух гармонических колебательных процессов: внешнего дыхательного возмущения и собственных колебаний системы. Однако широко известна индивидуальная вариативность волнового пика в низкочастотном диапазоне спектра (от 0,05 Гц до 0,15 Гц), поэтому недостатком существующих подходов является то, что частота дыхания 1 вдох /6 секунд (0,1 Гц) [11-14], не всегда будет иметь резонансный отклик в СВУС.

Следовательно, перспективным является использование метода УД с индивидуально подобранной частотой [22]. Однако в применяемых методиках, как правило, отсутствуют критерии оценки адекватности и эффективности использования параметров УД с точки зрения функционального состояния всей ССС, взаимодействия ее отделов между собой, определяемого качеством и согласованностью функционирования механизмов их вегетативной регуляции, т.е. в области применения метода УД мы сталкиваемся с типичной научной ситуацией, когда применение на практике новых идей опережает понимание механизмов действия фактора, лежащего в их основе. Поэтому возможность изменения параметров СВУС и функционального состояния организма в целом под влиянием УД с индивидуально подобранной частотой остается неизученной. В связи с этим, целью настоящего исследования явилось выявление изменений показателей ВСР и ФНД в условиях УД с индивидуально подобранной частотой, соответствующей частоте колебаний СР в LF-диапазоне.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании принимали участие 42 условно здоровых студента-волонтера женского пола в возрасте 18-21 года. Все испытуемые дали добровольное согласие на участие в исследовании.

Предварительная запись ВСП с помощью программно-аппаратного комплекса (АПК) «Омега-М» (производство научно-исследовательской лаборатории «Динамика», г. Санкт-Петербург) выявила индивидуально-типологические отличия этих испытуемых, связанные, в частности, со значениями стресс-индекса (S_i или индекс напряженности ИН [23]): у 21% значение S_i не превышало 50 усл.ед, у 50% – находилось в пределах 50-200 усл.ед., а у 29% – превышало 200 усл.ед.

В эксперимент были отобраны волонтеры только со значениями S_i от 50 до 200 усл. ед. ($n = 21$). Такой отбор связан с тем, что, во-первых, позволил сформировать однородную группу испытуемых, а, во-вторых, поскольку испытуемые с таким S_i преобладают среди обследованных студентов, то, можно предположить, что у них развивается наиболее типичная реакция на УД.

Исследования проводили ежедневно в течение 10-ти дней и через 7 дней после окончания курса УД (17 день эксперимента) для регистрации эффекта последствия в одно и то же время суток, что позволило исключить влияние суточных колебаний ВСП на результаты исследования [24, 25].

Исследования начинали с регистрации ЭКГ сигнала в первом стандартном отведении с помощью АПК «Омега-М», разработанного на основе принципиально нового метода дискретного динамического анализа совокупности ритмов сердца и мозга. Ритмограммы, выделяемые в процессе обработки из электрокардиосигнала, представляют собой последовательности временных интервалов между соседними сердечными возбуждениями. Для аппаратно-программной реализации метода из электрокардиосигнала выделяют пять ритмов: $R-R$ интервалограмма (последовательность $R-R$ интервалов); $R-T$ интервалограмма (последовательность $R-T$ интервалов); отношения амплитуды R и T зубцов (последовательность отношения амплитуды R и T); скажность электросигнала (последовательность значений отношения периода следования кардиокомплекса к его длительности). Из каждого ритма выделяют волны 1-го порядка, представляющие собой огибающие этих ритмов. Таким образом, осуществляется корректный переход от ритмограмм к временным функциям.

Регистрацию проводили в положении сидя при спокойном дыхании в течение 5-ти минут, то есть времени, необходимого для набора 300 кардиокомплексов. Для реализации поставленной цели были использованы основные методы анализа ВСП (в системе оценок, рекомендуемых стандартами Европейского кардиологического общества и Северо-американского общества стимуляции и электрофизиологии [26]): статистический (RMSDD, СКО, pNN50), геометрический (A_m , M_m , D_x), спектральный (HF, LF, VLF, TOTAL, LF/HF), которые подробно описаны в наших предыдущих исследованиях [27].

Известно, что колебания временного ряда кардиоинтервалов обладают самоподобными свойством, то есть отмечается повторяемость свойств в различных временных масштабах [28]. Поскольку ССС человека самоорганизована таким

способом, что не имеет характерной шкалы длительности или времени, разумно было бы ожидать нарушения ее структуры из-за какого-либо отклонения в функциональном состоянии. Поэтому, применение фрактального анализа биоритмов позволяет получить более полную информацию о состоянии биологических объектов и существенно дополнить существующие классические методы анализа СР. В связи с этим, дополнительно к методам оценки ВСР были проанализированы показатели ФНД, в частности, показатели автономной (А), вегетативной (В), центральной регуляции (С), психоэмоционального состояния (D) и интегральный показатель функционального состояния (HEALTH).

Нейродинамический метод обработки ритмограмм представляет собой способ преобразования сигналов $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$, $f_4(t)$ и $f_5(t)$ в кодовую комбинацию по двоичному основанию, состоящую из последовательности импульсов, все параметры которых одинаковы.

В первый день эксперимента фоновую запись показателей ВСР и ФНД проводили на фоне спонтанного дыхания – контрольная запись. При этом контролировали отсутствие форсированных вдохов и задержек дыхания во время регистрации ЭКГ, тем самым, исключая произвольные влияния дыхания на ССС, т.е. исследования проводили в относительно стандартных условиях.

В последующие 10 дней эксперимента запись показателей ВСР и ФНД осуществляли на фоне УД, частота которого соответствовала частоте локализации максимального пика мощности СР в низкочастотном (LF) диапазоне.

Во время сеанса УД каждый испытуемый дышал под индивидуальный ритм, задаваемый «дыхательным шаром», параметры которого рассчитывались по ритмограмме, записанной непосредственно перед сеансом дыхания на АПК «Омега» (рис. 1, 2).

Глубина дыхания соответствовала размеру шара: чем больше шар – тем глубже вдох, чем меньше шар – тем полнее выдох.

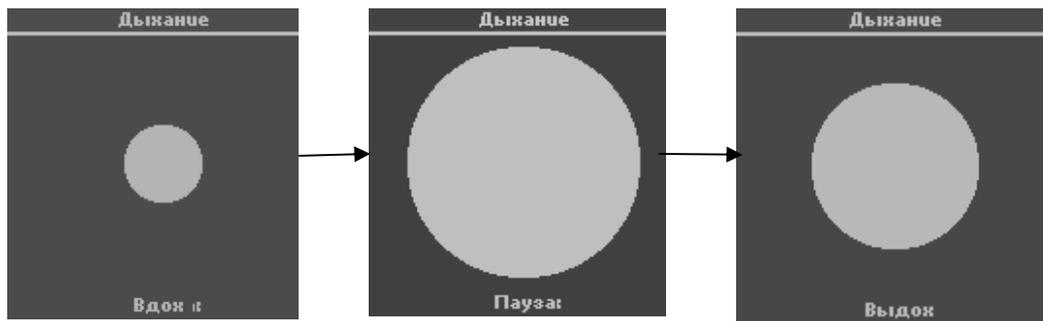


Рис. 1. Фазы управляемого дыхания, задаваемые программно-аппаратным комплексом «Омега».

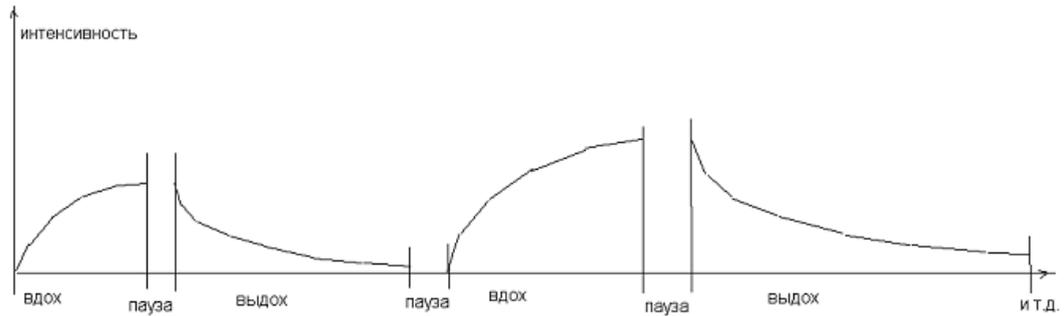


Рис. 2. График фаз управляемого дыхания, реализованных в комплексе «Омега-М».

Соотношение временных интервалов вдоха и выдоха было постоянно и составляло 38% вдох и 62% выдох, что соответствует правилу «золотого сечения» [29]. Периоды дыхания сначала экспоненциально росли и в завершающей фазе экспоненциально сокращались.

Продолжительность сеанса УД составляла около 5-ти минут. Повторную запись ритмограммы проводили не ранее, чем через 5 минут после окончания сеанса УД.

Критерием эффективности используемого метода являлось изменение показателей ВСП и ФНД относительно контрольной записи, полученной в 1-й (фоновый) день эксперимента. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета программ «Омега-М» и «Статистика 6.0». Достоверность различий полученных данных определяли с помощью критерия Вилкоксона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Статистическими методами анализа СР у испытуемых в течение десятидневного курса УД с индивидуально подобранной частотой выявлено достоверное ($p < 0,05$) увеличение значений показателей PNN50, RMSSD и СКО, начиная со 2-х, 3-х и 5-х суток наблюдения соответственно (рис. 3). К окончанию курсового воздействия УД, т.е. на 10-е сутки исследования значения показателей RMSSD, СКО и PNN50 увеличились относительно фоновых значений этих показателей на 30% ($p < 0,05$), 28% и 71% ($p < 0,01$) соответственно.

Кроме того, следует отметить, что через 7 суток после прекращения сеансов УД значения показателей статистического анализа ВСП оставались достоверно выше исходных (рис. 3), что позволяет говорить о выраженном эффекте последствия данного курса.

Известно, что СКО является суммарным показателем вариабельности величин интервалов R-R за весь рассматриваемый период, характеризующий ВСП в целом [30], а рост СКО указывает на усиление автономной регуляции. Значения показателя RMSSD вычисляются по динамическому ряду разностей значений последовательных пар кардиоинтервалов и не содержат медленноволновых составляющих СР [31]. Увеличение разности между кардиоинтервалами приводит к повышению значения RMSSD, что указывает на увеличение активности парасимпатического звена ВНС.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАбельНОСТИ РИТМА СЕРДЦА

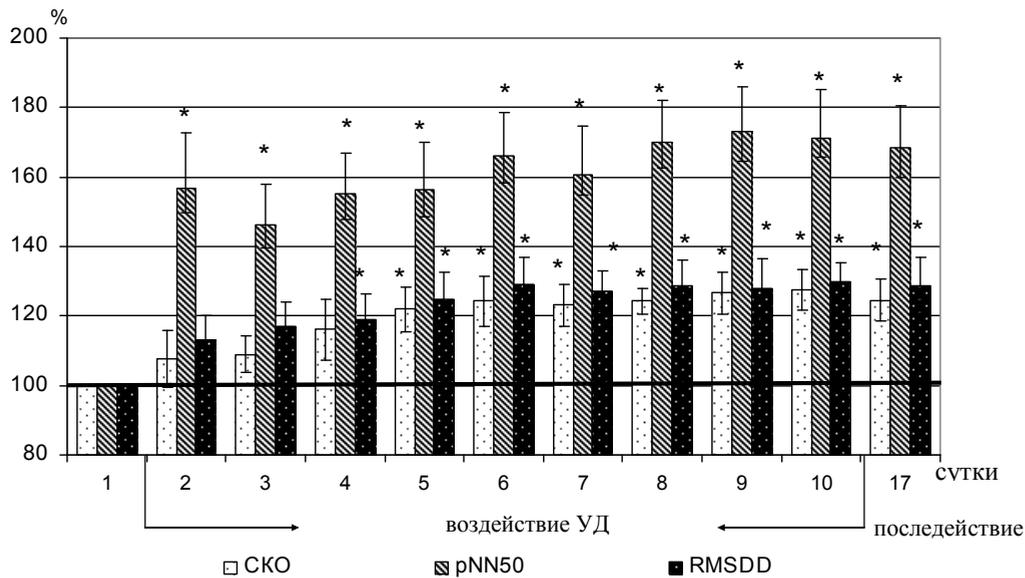


Рис. 3. Изменение показателей статистического анализа ритма сердца под влиянием управляемого дыхания с индивидуально подобранной частотой у испытуемых в разные сроки эксперимента (в % относительно исходных значений, принятых за 100%).
Примечание: * – достоверность различий $p < 0,05$ по критерию Вилкоксона относительно исходных значений изученных показателей.

Наряду со стабилизацией, начиная с 5-6-х суток наблюдения, значений показателей SKO и RMSSD, было зарегистрировано наиболее раннее (после 1-го воздействия УД) и значительное, особенно выраженное на 9-е сутки (на 73% ($p < 0,05$) относительно исходных значений) повышение pNN50. Показатель pNN50 дает информацию, аналогичную RMSSD, но, поскольку при его вычислении учитываются лишь разностные значения, величина которых выше, чем 50 мс, то этот показатель более чувствителен к высокочастотным, дыхательным колебаниям СР и, следовательно, лучше отражает активность автономного контура регуляции и тонус ВНС.

Таким образом, увеличение значений показателей статистического анализа ВСР (SKO, pNN50 и RMSSD) свидетельствует о том, что под влиянием курсового воздействия УД у испытуемых произошло усиление автономного контура и, в частности, парасимпатического звена ВНС в регуляции СР.

Полученные результаты подтверждаются и данными геометрического анализа СР, которые свидетельствуют о том, что уже после 5-тикатного воздействия УД произошло достоверное изменение исследуемых показателей (рис. 4), а на десятые сутки наблюдения значения показателя Dх были на 17% ($p < 0,01$) выше, а показателя Амо на 19% ($p < 0,05$) ниже исходных значений. Через семь суток после курса УД, биологические ответы достоверно отличались от исходных значений: Амо – 83%, Dх – 114% ($p < 0,05$; рис. 4).

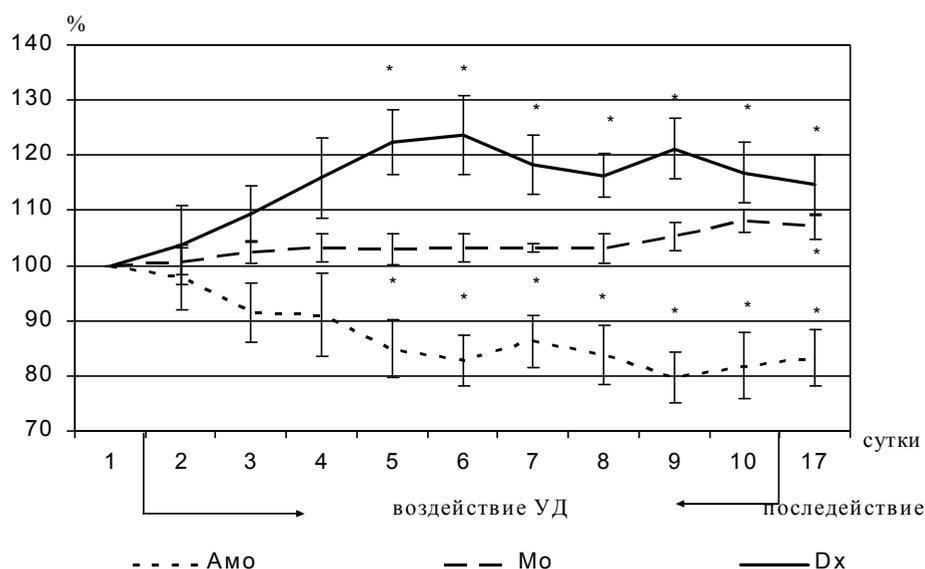


Рис. 4. Изменение показателей геометрического анализа ритма сердца под влиянием управляемого дыхания с индивидуально подобранной частотой у испытуемых в разные сроки эксперимента (в % относительно исходных значений, принятых за 100%).
Примечание: обозначения те же, что и на рис. 3.

Известно [23], что под геометрическими методами анализа ВСР подразумевается математический анализ гистограмм распределения R-R интервалов. Так, расширение основания и уплощение купола гистограммы R-R, зарегистрированное в нашем исследовании у испытуемых под воздействием курса УД на частоте локализации максимального пика мощности колебаний в низкочастотном диапазоне спектра СР, характеризуется уменьшением значений показателя Amo и увеличением значений Dx и Mo и свидетельствует об активизации парасимпатического и уменьшении влияния симпатического отдела ВНС на СР, а так же об усилении активности автономного контура регуляции ССС [26].

Данные геометрического анализа количественно могут быть выражены в показателях вариационной пульсометрии, наиболее распространенным и информативным методом которой является анализ стресс-индекса Si регуляторных систем организма.

Под влиянием УД к 5-м суткам эксперимента у испытуемых произошло достоверное снижение Si на 31% ($p < 0,05$) относительно фоновых значений этого показателя (рис. 5).

Необходимо отметить, что после следующих сеансов УД значения данного показателя находились в пределах 75-80 усл.ед., что свидетельствует о выходе значений этого показателя на «плато» (рис. 5). На этом же уровне Si оставался и через 7 дней после окончания курса УД.

Как известно [32], Si характеризует степень преобладания симпатических влияний над парасимпатическими и уровень напряженности регуляторных систем

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА

СР [23]. Поэтому снижение значений этого показателя под воздействием УД на частоте локализации максимального пика в LF-диапазоне СР еще раз свидетельствует об увеличении вагусных влияний на СР и снижении уровня напряженности регуляторных систем организма испытуемых.

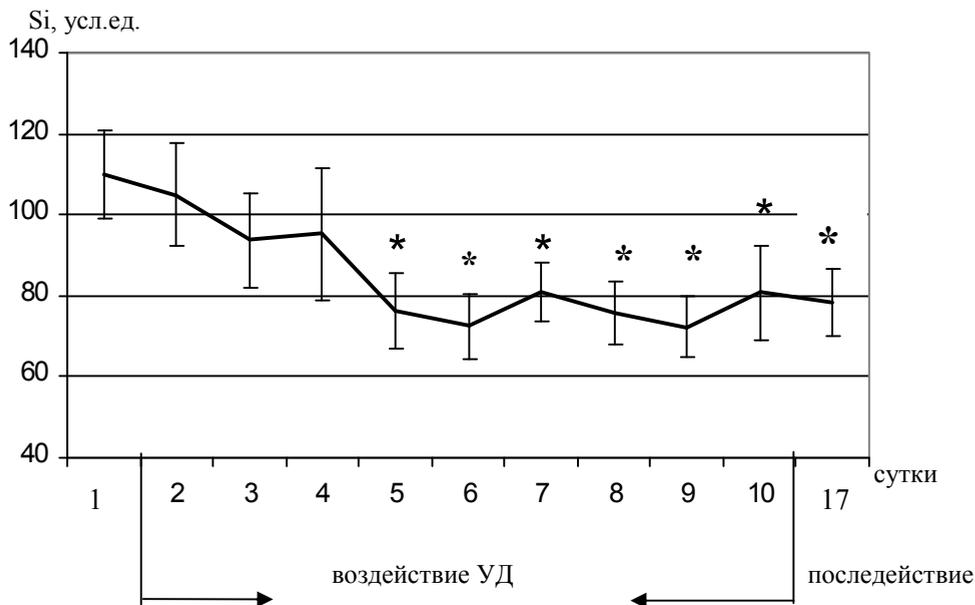


Рис. 5. Изменение S_i (усл.ед.) под влиянием управляемого дыхания с индивидуально подобранной частотой у испытуемых в разные сроки эксперимента.
Примечание: обозначения те же, что и на рис. 3.

Заметим, что S_i увеличивается в 1,5 – 2,0 раза при физической нагрузке [33], в 1,1 – 3,9 раза при эмоциональном предэкзаминационном стрессе у студентов и школьников [34], в 1,4 – 1,7 раза у космонавтов во время магнитной бури [35], в 20 – 30 раз у спортсменов, участвующих в соревнованиях по спортивным играм и в единоборствах, что свидетельствует о состоянии сильнейшего функционального напряжения «на грани срыва адаптации» [36]. Поэтому существенное снижение S_i у испытуемых уже после 5-тикратного воздействия УД открывает возможности практического использования данного метода для снижения уровня стресса, вызванного психоэмоциональными или физическими нагрузками.

Спектральный анализ модуляционных характеристик биоэлектрических сигналов, который широко используется как неинвазивный метод изучения вегетативной регуляции сердца, показал достоверные изменения исследуемых показателей у испытуемых, начиная со 2-3-х суток эксперимента (рис. 6).

Однако максимальное увеличение значений исследуемых показателей было зарегистрировано на 10-е сутки воздействия УД, когда значения мощности спектра

в LF и HF диапазонах СР возросли на 112 и 69% ($p < 0,01$) соответственно относительно фоновых значений этих показателей. Следует отметить, что в большей мере происходил рост мощности LF-компоненты спектра. Изменения VLF-компоненты спектра были не достоверны.

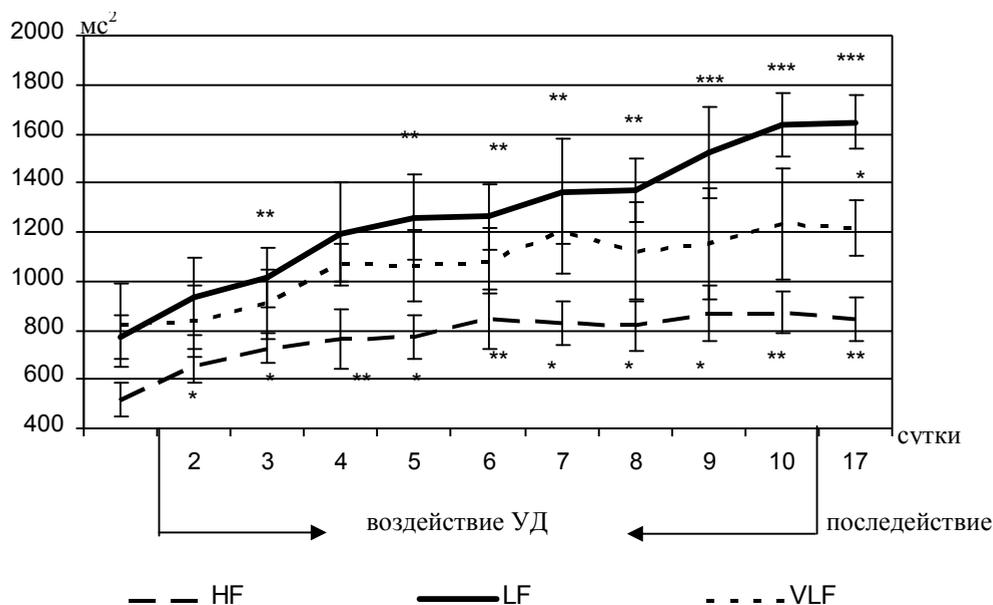


Рис. 6. Изменение мощности спектральных компонентов сердечного ритма (ms^2) под влиянием управляемого дыхания с индивидуально подобранной частотой у испытуемых в разные сроки эксперимента.

Примечание: обозначения те же, что и на рис. 3.

Многочисленные экспериментальные данные указывают на то, что спектр ВСР, получаемый при анализе коротких (3-5 минутных) фрагментов ритмограмм, имеет исключительно нейрогенную природу, поскольку как высокочастотный, так и оба низкочастотных компонента в спектре ВСР исчезают после денервации сердца [37], нет их у пациентов с трансплантированным сердцем [38] и у плодов – анэнцефалов [39].

В настоящее время считается установленным, что HF-компонента спектра СР (0,15 - 0,4 Гц) связана с дыхательными движениями и отражает вагусный контроль СР, тогда как LF составляющая характеризует состояние симпатического отдела ВНС [26], и, в частности, системы регуляции сосудистого тонуса (активность вазомоторного центра). Кроме того, некоторыми авторами показано, что увеличение мощности LF-компоненты СР свидетельствует об улучшении барорефлекторной регуляции гемодинамики [18].

Кроме того, под влиянием УД отмечалась тенденция ($p > 0,05$) к изменению коэффициента симпатовагусного взаимодействия LF/HF. Так, с 4-х суток исследования зарегистрировано возрастание коэффициента LF/HF, значения

ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ РИТМА СЕРДЦА

которого достигли максимума к 9-м суткам и составили $2,58 \pm 0,51$ усл.ед., что соответствует 135% от контрольных значений.

Известно, что динамика данного показателя свидетельствует об изменении баланса симпатического и парасимпатического компонента ВНС [30]. Вместе с тем, под влиянием УД соотношение LF/HF компонентов спектра приблизилось к 3, что свидетельствует о преобладании низкочастотных ритмов и указывает на усиление барорефлекторной регуляции и симпатических влияний на СР испытуемых.

Следовательно, полученные нами данные об увеличении мощности как LF, так и HF-компонент спектра СР, а так же коэффициента LF/HF у испытуемых под воздействием УД на частоте низкочастотной составляющей спектра СР может свидетельствовать об усилении вагусных воздействий и барорефлекторной регуляции СВУС.

Наряду с изменением мощности отдельных компонентов спектра ВСР, под влиянием УД произошло увеличение общей мощности спектра (TP) (рис. 7).

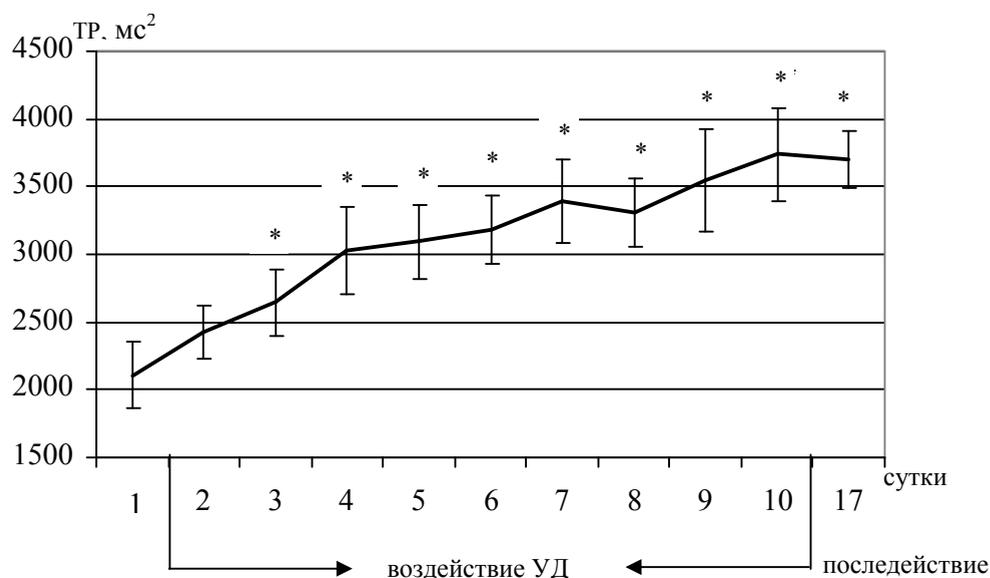


Рис. 7. Изменение показателя общей мощности спектра (мс^2) под влиянием управляемого дыхания с индивидуально подобранной частотой у испытуемых в разные сроки эксперимента.

Примечание: обозначения те же, что и на рис. 3.

Так, на 10-е сутки УД у испытуемых зарегистрированы максимальные значения TP, составившие 177% ($p < 0,001$) относительно фоновых значений этого показателя.

Известно, что TP отражает суммарную активность вегетативных воздействий на СР. Вагусная активация обычно сопровождается увеличением TP [26]. Поэтому увеличение TP у испытуемых под влиянием УД с индивидуально-подобранной

частотой может быть связано с активацией вегетативного и уменьшением влияния центрального контура регуляции СВУС.

Вместе с тем, известно, что чем выше общая мощность спектра, тем более выражены адаптационные возможности организма [26]. Поэтому можно сделать вывод, что под влиянием УД происходит увеличение адаптационного потенциала организма испытуемых, что согласуется с литературными данными [22].

Поскольку в прикладной физиологии и клинической медицине ВСР используется не только для изучения СВУС, но и для оценки функциональных резервов, особенностей регуляции и адаптационных реакций организма, то на следующем этапе исследования анализировали изменения под влиянием УД производных параметров ВСР – интегральных показателей ФНД, которые дают возможность свести в единое целое информацию со всех уровней регуляции организма.

Применение курсового воздействия УД привело к увеличению всех исследуемых показателей ФНД испытуемых в среднем на 17-23% ($p < 0,01$) относительно фоновых значений (табл.).

Таблица.

Динамика интегральных показателей функционального состояния испытуемых

Сутки	Показатели				
	A	B	C	D	Health
1	61,21 ± 2,83	66,94 ± 4,33	56,42 ± 3,58	57,94 ± 2,75	60,63 ± 3,10
2	69,48 ± 4,03 $p < 0,05$	70,70 ± 4,82	62,41 ± 3,31	63,91 ± 3,12	66,62 ± 3,53 $p < 0,05$
3	65,03 ± 3,37 $p < 0,05$	74,38 ± 4,52	64,52 ± 2,62 $p < 0,05$	63,47 ± 2,69	66,85 ± 2,86 $p < 0,05$
4	66,08 ± 4,74	74,33 ± 5,49	59,97 ± 4,02	62,38 ± 4,41	69,50 ± 3,37 $p < 0,01$
5	70,07 ± 3,83 $p < 0,05$	79,64 ± 3,91 $p < 0,05$	65,67 ± 4,16 $p < 0,05$	66,24 ± 3,48 $p < 0,05$	70,41 ± 3,63 $p < 0,05$
6	72,06 ± 3,53 $p < 0,01$	81,53 ± 3,38 $p < 0,01$	65,98 ± 3,35 $p < 0,05$	67,18 ± 2,98 $p < 0,05$	71,69 ± 3,04 $p < 0,01$
7	70,08 ± 2,87 $p < 0,01$	77,24 ± 2,21 $p < 0,01$	66,30 ± 3,44 $p < 0,05$	68,53 ± 2,91 $p < 0,01$	70,54 ± 2,83 $p < 0,01$
8	71,44 ± 3,26 $p < 0,05$	81,42 ± 3,28 $p < 0,01$	65,59 ± 2,65 $p < 0,05$	68,15 ± 2,74 $p < 0,05$	71,65 ± 2,62 $p < 0,05$
9	73,80 ± 3,05 $p < 0,01$	82,44 ± 3,21 $p < 0,01$	69,48 ± 2,62 $p < 0,01$	69,97 ± 2,10 $p < 0,01$	73,92 ± 2,37 $p < 0,001$
10	71,87 ± 3,26 $p < 0,05$	80,14 ± 4,60 $p < 0,01$	69,07 ± 2,88 $p < 0,01$	71,13 ± 3,20 $p < 0,01$	73,39 ± 3,29 $p < 0,01$
17	74,05 ± 3,74 $p < 0,01$	81,53 ± 3,74 $p < 0,05$	71,48 ± 3,49 $p < 0,01$	72,08 ± 3,66 $p < 0,01$	73,60 ± 3,61 $p < 0,01$

Следует отметить, что достоверное увеличение значений интегральных показателей функционального состояния у испытуемых под воздействием 10-

тидневного курса УД было зарегистрировано уже на 3 – 5-е сутки воздействия и продолжало плавно увеличиваться на протяжении всего курса, оставаясь достоверно высоким и через 7 дней после окончания курса УД.

Полученные данные ФНД свидетельствуют о том, что УД с частотой колебаний низкочастотной компоненты спектра СР обеспечивает регуляцию управляющих функций СР на разных уровнях: автономном, вегетативном, гипоталамо-гипофизарном, центральном, а, следовательно, способствует увеличению адаптивных возможностей всего организма.

Особый интерес представляют результаты анализа динамики изменений показателей ВСР и ФНД в зависимости от продолжительности курса УД. Эти различия касались большинства показателей ВСР и ФНД. Достоверные изменения изучаемых параметров наблюдались уже после 3-хкратного воздействия УД, однако максимальные эффекты курсового воздействия УД регистрировались к 9 – 10-м суткам. Таким образом, нашими исследованиями показано, что на начальных этапах реакция ССС и организма в целом на воздействие УД развивается медленно, а при многократном воздействии усиливается и сохраняется длительное время, что позволяет говорить о кумулятивном эффекте УД на частоте LF-компоненты СР.

Эти данные во многом опровергают мнение некоторых авторов [40], которыми показана эффективность применения однократного УД с целью повышения анаэробного порога и достижения «допингового эффекта». Однако «допинговый эффект» кратковременен и не позволяет достичь длительного эффекта последствия данного метода, а, следовательно, устойчивого изменения функционального состояния организма.

Таким образом, согласно приведенным результатам исследования, десятидневное воздействие УД с индивидуально подобранной частотой вызывает достоверное изменение изученных показателей ВСР и его производных. Известно [32], что ВСР является интегрированным показателем взаимодействия трех регулирующих СР факторов: рефлекторного симпатического, рефлекторного парасимпатического и гуморально-метаболически-медиаторного. Изменение СР является универсальной оперативной реакцией целостного организма в ответ на любое воздействие внешней среды и характеризует баланс между тонусом симпатического и парасимпатического отделов. Поэтому полученные нами данные о достоверном изменении показателей ВСР и ФНД свидетельствуют о нормализации посредством УД на частоте максимального пика в LF-диапазоне СР симпатовагусного баланса организма испытуемых. Курсовое воздействие УД весьма интенсивно влияло как на активность парасимпатического (RMSSD, pNN50, Dx) и симпатического (Amo) отделов ВНС, так и на суммарный эффект вегетативной регуляции (СКО). Существенные изменения вследствие курсового воздействия УД испытывал и индекс напряжения регуляторных систем (Si), что свидетельствует об адаптационных изменениях в организме испытуемых. Важно подчеркнуть, что значительно изменялись под влиянием УД и волновые показатели ВСР, отражающие внутреннюю структуру ряда кардиоинтервалов и позволяющие судить о механизмах, обеспечивающих наблюдаемый конечный эффект регуляторных воздействий. Эти изменения затрагивали как показатели суммарной мощности

спектра ВСР (TR), так и ее составляющих – HF, LF, т.е. автономный и сегментарный уровни регуляции СР. При этом произошло наиболее значимое увеличение мощности спектра в LF диапазоне СР в ответ на УД по сравнению с значениями этих показателей в условиях спонтанного дыхания. По мнению А.Р. Киселева с соавт. [41, 42] спектральные компоненты ВСР характеризуют состояние СВУС в конкретный момент времени, при этом низкочастотный (LF) диапазон спектра ВСР является следствием функциональной активности центральных механизмов СВУС, а высокочастотный (HF) – характеризует процессы взаимодействия сердечно-сосудистого и дыхательного центров регуляции в условиях спонтанного дыхания. Поэтому, можно предположить, что зарегистрированное явление более значительного увеличения LF-компоненты по сравнению с HF в условиях УД может быть связано с центральной и вегетативной респираторно-зависимой синхронизацией между дыхательной и ССС и свидетельствует об усилении барорефлекторной регуляции на основе эффекта резонанса в спектре СР при воздействии УД на частотах колебаний данного спектра.

Таким образом, LF-компонента спектра ВСР является маркером функционального состояния СВУС, изучение которой необходимо проводить в условиях УД с частотой, соответствующей частоте локализации максимального пика мощности СР в низкочастотном (LF) диапазоне.

Необходимо отметить, что достоверное повышение производных показателей ВСР, полученных с помощью метода ФНД, свидетельствует, что УД с индивидуально подобранной частотой обеспечивает регуляцию управляющих функций СР на разных уровнях: автономном, вегетативном, гипоталамо-гипофизарном, центральном, а, следовательно, способствует увеличению адаптивных возможностей всего организма.

Следовательно, динамика показателей ВСР и ФНД свидетельствует о том, что курсовое воздействие УД с индивидуально подобранной частотой способно избирательно изменять основные механизмы регуляции СР, имеющие адаптационное значение, в результате чего восстанавливаются межсистемные связи в значительной степени из-за нормализации вегетативной регуляции, что ведет к активации внутренних резервов организма, механизмов неспецифической резистентности, оптимизации нейроэндокринной регуляции и расширению физиологических резервов и способствует нормализации функционального состояния организма в целом.

По-видимому, это можно объяснить тем, что для работы того или иного колебательного контура управления, которым, в частности, является СВУС важное значение имеет система обратной связи [43]. При этом характер эфферентного сигнала будет зависеть от характеристик афферентной информации, поступившей в центр управления колебательным контуром. Разнообразие качества афферентной информации, обусловленное влиянием различных окружающих систему факторов, порождает адекватный условиям эфферентный сигнал, что является оптимальным способом функционирования системы управления. Введение в афферентный сигнал гармонической составляющей с частотой, совпадающей с основной частотой колебаний контура управления, обуславливает определенную стандартизацию

афферентной информации в интервале времени в данном контуре, т.е. возможна синхронизация механизмов контроля, адекватно изменяющимся условиям окружающей среды. Поэтому, изменение свойств собственных колебательных процессов организма возможно на основе эффекта резонанса в спектре ВСР при воздействии УД на частотах колебаний спектра СР.

Таким образом, применение УД с частотой, подбираемой индивидуально на основе предварительной записи ВСР, можно расценивать, как введение периодической компоненты во внешний сигнал с целью гармонизировать систему вегетативного управления организма человека, а достоверные, позитивные изменения показателей ВСР и ФНД у испытуемых связаны с процессом подстройки эндогенных ритмов под внешний ритм, задаваемый УД. Действительно, во многих исследованиях показана кардиореспираторная синхронизация, т.е. синхронизация между основным СР и ритмом дыхания [6, 44]. При этом увеличение синхронизации сердечных и дыхательных ритмов расценивается как улучшение адаптационных возможностей ССС и организма в целом. Однако окончательные выводы об изменении синхронизации изучаемых ритмических процессов можно будет сделать, только проведя одновременную синхронную запись ВСР и пневмограммы с расчетом коэффициента кросс-корреляции, что и является предметом наших будущих исследований. Обнаружение синхронизации будет служить доказательством адекватного взаимодействия функциональных компонентов ССС при адаптации к УД с индивидуально подобранной частотой.

ВЫВОДЫ

1. Управляемое дыхание, частота которого соответствует частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне, является мощным механизмом управления сердечным ритмом и изменением функционального состояния организма в целом.
2. Изучение свойств собственных колебательных процессов СВУС возможно на основе эффекта резонанса в спектре ВСР при воздействии управляемого дыхания с частотой, соответствующей частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне.
3. Увеличение значений показателей статистических методов анализа ВСР СКО (на 28%; $p < 0,01$), $rNN50$ (на 71%; $p < 0,01$) и $RMSSD$ (на 30%; $p < 0,05$) свидетельствует о том, что под влиянием курса УД с частотой, соответствующей частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне, происходит усиление активности автономного контура и парасимпатического звена регуляции, а, следовательно, оптимизация регуляции физиологических функций.
4. Применение геометрических методов анализа ВСР показало, что под влиянием УД с индивидуально подобранной частотой произошло увеличение значений показателя Dx (на 17%; $p < 0,01$) на фоне снижения $A_{\alpha\alpha}$ (на 19%; $p < 0,01$), что свидетельствует об активации парасимпатического звена ВНС, активации автономного контура регуляции и ослаблении централизации управления сердечным ритмом.

5. Под влиянием УД с индивидуально подобранной частотой происходит значительное снижение S_i (на 26%), что свидетельствует об увеличении вагусных влияний на ритм сердца и уменьшении напряжения регуляторных систем.
6. Увеличение общей мощности спектра (на 77%; $p < 0,001$) под влиянием УД на частоте колебаний LF-компоненты спектра сердечного ритма свидетельствует об усилении вегетативного воздействия на ритм сердца, причем увеличение мощности LF-компоненты (на 112%) спектра происходит в гораздо большей мере, чем мощности HF-компоненты (на 69%; $p < 0,01$), что связано с центральной и вегетативной респираторно-зависимой синхронизацией между дыхательной и сердечно-сосудистой системами и свидетельствует об усилении барорефлекторной регуляции на основе эффекта резонанса в спектре сердечного ритма при воздействии УД на частотах колебаний данного спектра.
7. LF-компонента спектра ВСР является маркером функционального состояния системы вегетативного управления ритмом сердца, изучение которой необходимо проводить в условиях УД с частотой, соответствующей частоте локализации максимального пика мощности сердечного ритма в низкочастотном (LF) диапазоне.
8. Достоверное повышение производных показателей ВСР, полученных с помощью метода фрактальной нейродинамики биоритмов, свидетельствует, что УД обеспечивает регуляцию управляющих функций сердечного ритма на разных уровнях: автономном, вегетативном, гипоталамо-гипофизарном, центральном, а, следовательно, способствует увеличению адаптивных возможностей организма.
9. Изменение показателей variability сердечного ритма и фрактальной нейродинамики биоритмов испытуемых под влиянием УД на частоте колебаний спектра сердечного ритма зависят от длительности курса: достоверные изменения изучаемых параметров наблюдались только после 3-кратного воздействия уд, а максимальные эффекты – к 9-10-м суткам.
10. Курсовое воздействие УД имеет выраженный эффект последствия, о чем свидетельствует достоверное изменение показателей variability сердечного ритма и фрактальной нейродинамики на протяжении последующих 7-ми дней после окончания курса.

Список литературы

1. Glass L., Mackey M.C. From clocks to chaos: the rhythms of life. – Princeton: Princeton University Press, 1988. – P. 214.
2. Glass L. Synchronization and rhythmic processes in physiology // Nature. – 2001. – V. 410. – P. 277.
3. Chaotic synchronization, applications to living systems. / E. Mosekilde, Yu. Maistrenko, D. Postnov – Singapore: World Scientific, 2002. – P. 42.
4. Malpas S. Neural influences on cardiovascular variability: possibilities and pitfalls. // *Physiol Heart Circ Physiol.* – 2002. – № 282. – P. 6-20.
5. Stefanovska A, Brac'ic M. Physics of the human cardiovascular system. // *Contemp Phys.* – 1999. – № 40. – P. 31-55.
6. Synchronization in Human Cardiorespiratory System / C. Schäfer, M.G. Rosenblum, H.H. Abel, J. Kurths // *Phys Rev E.* – 1999. – № 65. – P. 20.

7. Brac̆ić-Lotrić M, Stefanovska A. Synchronization and modulation in the human cardiorespiratory system. // *Physica A*. – 2000. – V. 283. – P. 61.
8. Phase relationships between two or more interacting processes from one-dimensional time. Application to heart-rate-variability data series / N.B. Janson, A.G. Balanov, V.S. Anishchenko, P. McClintock // *Phys Rev E*. – 2002. – № 65. – P. 62.
9. Synchronization between main rhythmic processes in the human cardiovascular system / M.D. Prokhorov, V.I. Ponomarenko, V.I. Gridnev, M.B. Bodrov, A.B. Bespyatov // *Phys Rev E*. – 2003. – № 68. – P. 13.
10. Regions of cardiorespiratory synchronization in humans under paced respiration / S Rzezcinski, N.B. Janson, A.G. Balanov, P. McClintock. // *Phys Rev E*. – 2002. – № 66. – P. 51.
11. Heart rate and blood pressure variability in normal subjects compared with data from beat-to-beat models developed from de Boer's model of the cardiovascular system / A.M. Whittam, R.H. Claytont, S.W. Lord et al. // *Physiol. Meas.* – 2000. – V. 21, № 2. – P. 305.
12. On the spectral analysis of blood pressure variability / R.W. De Boer, J.M. Karemaker, J. Stracker // *Physiol.* – 1986. – V. 251, № 3. – P. 685.
13. Relationships between short-term blood pressure fluctuations and heart variability in resting subjects. I: A spectral analysis approach / R.W. De Boer, J.M. Karemaker, J. Stracker // *Med. Biol. Eng. Comput.* – 1985. – V. 23, № 4. – P. 352.
14. Hemodynamic fluctuations and baroreflex sensitivity in humans: a beat-to-beat model / R.W. De Boer, J.M. Karemaker, J. Stracker // *Physiol.* – 1987. – V. 253, № 3. – P. 680.
15. Low-frequency oscillation in arterial pressure and heart-rate: a simple computer model / Madwed J.B., Albrecht P., Mark R.G., Cohen R.J. // *Am. J. Physiol.* – 1989. – V. 256, № 6. – P. 1573.
16. Pagani M., Malliani A. Interpreting oscillations of muscle sympathetic nerve activity and heart rate variability // *J. Hypertension*. – 2000. – V. 18, № 12. – P. 1709.
17. Physiology and pathophysiology of heart rate variability in humans: is power spectral analysis largely an index of baroreflex gain? / Sleight P., La Rovere M.T., Mortara A. et al. // *Clin. Sci.* – 1995. – V. 88, № 1. – P. 103.
18. Richter D. W., Spyer K. M Central regulation of autonomic functions. / *Cardiorespiratory control* – NY: Oxford Univ. Press, 1990. – P. 189-207.
19. Vascular resistance and arterial pressure low-frequency oscillations in the anesthetized dog / Cevese A., Grasso R., Poltronieri R., Schena F. // *Am. J. Physiol.* – 1995. – V. 268, № 1. – P. 7.
20. Arterial baroreceptor as determinants of 0.1 Hz and respiration-related changes in blood pressure and heart rate spectra. Frontiers of blood pressure and heart rate analysis / Bernardi L., Passino C, Spadacini G. et al. – Amsterdam: IOS Press, 1997. – P. 241.
21. Исследование синхронизации между ритмами сердечно-сосудистой системы человека по последовательности R-R-интервалов / М.Д. Прохоров, М.Д. Бодров, В.И. Пономаренко, В.И. Гриднев, А.Б. Беспятов // *Биофизика*. – Т. 50, Вып. 5. – 2005. – С. 914-919.
22. Триняк Н.Г. Управление дыханием и здоровье. – К.: Здоровья, 1991. – 310 с.
23. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. – М.: Медицина, 1997. – 236 с.
24. Circadian rhythms of frequency domain measures of heart rate variability in healthy subjects and patients with coronary artery disease. Effects of arousal and upright posture / Huikuri H.V., Niemela M.J., Ojala S. et al. // *Circulation*. – 1994. – V. 90, № 1. – P. 121.
25. Heart rate dynamics during human sleep / Cajochen C., Pischke J., Aeschbach D. et al. / Sapoznikov D., Luria M.H., Mahler Y. et al. // *Physiol. Behav.* – 1994. – V. 55, № 4. – P. 769.
26. Heart rate variability. Standards of Measurement, Physiological interpretation and clinical use // *Circulation*. – 1996. – V. 93. – P. 1043-1065.
27. Особенности системы вегетативного управления сердцем у испытуемых с различным типом вегетативной регуляции / Е.Н. Чуян, Е.А. Бирюкова, М.Ю. Раваева, И.Р. Никифоров // *Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В. И. Вернадского*. – 2009. – Том 22 (61), №1. – С. 113-133. (Сер. «Биология, химия»).
28. Kobayashi M. Musha T. 1/f fluctuation of heartbeat period // *IEEE Trans. Biomed. Eng.* – 1982. – V. 29. – P. 456.

29. Обоснование аппаратно-программных методов, предназначенных для скрининг-диагностики внутренних заболеваний и для оценки эффективности лечебно-профилактических мероприятий в системе диспансеризации военнослужащих и пенсионеров МО: отчет о научно-исследовательской работе. – СПб: ВМА, 2002. – 77 с.
30. Михайлов В.М. Вариабельность ритма сердца: опыт практического применения. – Иваново: Иван. гос. мед. академия, 2002. – 290 с.
31. Индивидуальный профиль функционального состояния организма студентов с различным тонусом вегетативной регуляции / Е.Н. Чуян, Е.А. Бирюкова, М.Ю. Раваева, И.Р. Никифоров // Ученые записки Таврического нац. ун-та им. В.И. Вернадского. – 2009. – Т. 22 (61), № 2 – С. 152-165. – (Сер. «Биология, химия».)
32. Баевский Р.М., Кирилов О.И. Математический анализ сердечного ритма при стрессе. – М.: Наука, 1984. – 220 с.
33. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин, и др. // Вестник аритмологии. – 2001. – Т. 24. – С. 66-85.
34. Щербатых Ю.В. Вегетативные проявления экзаменационного стресса: автореф. диссертации д-ра биол. наук. – СПб., 2001. – 12 с.
35. Григорьев, А.И., Баевский, Р.М. Концепция здоровья и проблема нормы в космической медицине. – М.: Ф-ма «Слово», 2001. – 96 с.
36. Соревновательный стресс у представителей различных видов спорта по показателям вариабельности сердечного ритма / Н.А. Агаджанян, Т.Е. Батоцзыренова, Ю.Н. Семенов, и др. // Теория и практика физической культуры. – 2006. – №1. – С. 2-4.
37. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: A quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control / Akselrod S.D., Gordon D., Ubel F.A. et al. // Science. – 1981. – V. 213, № 4503. – P. 220-222.
38. Spectral analysis of heart rate variability following human of heart transplantation: evidence for functional enervation / Fallen E.L., Kamath M.V., Chista D.N., Fitchelt D. // Nerv. Syst. – 1988. – V. 23. – P. 199.
39. Neurological control. of fetal heart ratele in 20 cases of anencephalic fetuses / Terao T., Kawashima Y, Noto H, Amyk J // Obstet. Gynecol. – 1984. – V. 149. – P. 201.
40. Система комплексного компьютерного исследования функционального состояния организма человека «Омега-М»: док. пользователя. – СПб., 2007. – 66 с.
41. Изучение природы периодических колебаний сердечного ритма на основе проб с управляемым дыханием / А.Р. Киселев, В.Ф. Киричук, О.М. Посненкова, В.И. Гриднев // Физиология человека. – 2005. – Т. 31, №3. – С. 76-83
42. Динамика мощности низко- и высокочастотного диапазонов спектра вариабельности сердечного ритма у больных ишемической болезнью сердца с различной тяжестью коронарного атеросклероза в ходе нагрузочных проб / А.Р. Киселев, В.И. Гриднев, О.М. Посненкова [и др.] // Физиология человека. – 2008. – Т.34, №3. – С. 57-64.
43. Ringlwood J.V. Malpas S.C. Slow oscillations in blood. pressure via a nonlinear feedback model // Am. J. of Physiology. – 2001. – V. 280, № 4. – P. 1105.
44. Seidel H, Herzel H. Analyzing entrainment of heartbeat and respiration with surrogates // IEEE Eng Med Biol Mag. – 1998. – V. 17. – P. 54-57.

Чуян О.М. Зміна показників вариабельності ритму серця і фрактальної нейродинаміки в умовах керованого дихання на частоті коливань спектру серцевого ритму / О.М. Чуян, О.О. Бірюкова, М.Ю. Раваєва, О.В. Янцев, Т.В. Заячникова // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Біологія, хімія. - 2009. - Т. 22 (61). – № 3. – С. 174-191.

Вивчені зміни показників вариабельності серцевого ритму і фрактальної нейродинаміки в умовах керованого дихання на частоті коливань спектру серцевого ритму. Показано, що кероване дихання, частота якого відповідає частоті локалізації максимального піку потужності серцевого ритму в низькочастотному (LF) діапазоні є потужним механізмом управління серцевим ритмом і зміною функціонального стану організму в цілому.

Вивчення властивостей власних коливальних процесів системи вегетативного управління ритмом серця можливо на основі ефекту резонансу в спектрі серцевого ритму при дії керованого дихання з

частотою, відповідній частоті локалізації максимального піку потужності серцевого ритму в низькочастотному (LF) діапазоні.

Ключові слова: кероване дихання, варіабельність серцевого ритму, фрактальна нейродинаміка, система вегетативного управління ритмом серця.

Chuyan E.N. Change of indicators of variability of the heart rate and , fractal neurodynamics in the conditions of controlled breathing on frequency of fluctuations of the spectrum of the heart rate / E.N. Chujan, E.A. Birjukova, M.U.Ravaeva , A.V. Yancev, T.V. Zayachnikova // Scientific Notes of Taurida V.Vernadsky National University. Series: Biology, chemistry. - 2009. - Vol. 22 (61). – № 3. – P. 174-191.

Changes of indicators of variability of a heart rate and fractal neurodynamics in the conditions of controlled breathing on frequency of fluctuations of a spectrum of heart rate are studied. It is shown that the controlled breathing, which frequency corresponds to frequency of localisation of the maximum peak of capacity of a heart rate in low-frequency (LF) a range is the powerful mechanism of management of a heart rate and change of a functional condition of an organism as a whole. Studying of properties of own oscillatory processes of system of vegetative management by a heart rate is possible on the basis of a resonance effect in a spectrum of a heart rate at influence of controlled breathing with the frequency corresponding to frequency of localisation of the maximum peak of capacity of a heart rate in low-frequency (LF) a range.

Keywords: controlled breathing, variability of a heart rate, fractal neurodynamics, system of vegetative management of a heart rate.

Поступила в редакцію 19.10.2009 г.