А.Б. Черепов[1], Е.Н. Яковенко[1, 2], Д.А. Поздеева[2], М.А. Лебедева[1, 2], А.Н. Котов[1], М.В. Баранов[1]

Вариабельность артериального давления как информативный параметр оценки физиологического воздействия гипогравитации

[1] НИИ космической медицины ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий» ФМБА России, г. Москва
[2] ФГБНУ «НИИ общей патологии и патофизиологии», г. Москва

A.B. Cherepov[1], E.N. Yakovenko[1, 2], D.A. Pozdeeva[2], M.A. Lebedeva[1, 2], A.N. Kotov[1], M.V. Baranov[1]

Blood pressure variability as an informative parameter for assessment of physiological effects of hypogravity on the cardiovascular system

[1] Research Institute for Space Medicine Federal Research Clinical Center of Specialized Types of Medical Care and Medical Technologies, Federal Biomedical Agency of Russia, Moscow
[2] Institute of General Pathology and Pathophysiology, Moscow, Russia

***Ключевые слова**: систолическое артериальное давление, диастолическое артериальное давление, моделированная гипогравитация, постельный режим, вариабельность сердечного ритма, вариабельность артериального давления.*

***Keywords**: systolic blood pressure, diastolic blood pressure, simulated hypogravity, bed rest, heart rate variability, blood pressure variability.*

Исследовали физиологические изменения сердечно-сосудистой системы при воздействии моделированной гипогравитации. Гипогравитацию моделировали с помощью орто- и антиортостатической гипокинезии. Цель работы заключалась в поиске информативных и наиболее чувствительных к данному воздействию параметров сердечно-сосудистой системы. В работе использовали спироартериокардиоритмограф (САКР) («Интокс», Россия), который одновременно и непрерывно регистрирует дыхание, электрокардиограмму в первом стандартном отведении и периферическое систолическое и диастолическое артериальное давление. Прибор фиксирует более 26 физиологических параметров сердечно-сосудистой системы. Программа рассчитывает длительность кардиоинтервалов (R–R, P, P–Q, Q–R, QRS, ST), систолическое и диастолическое давление каждого сердечного цикла, скорость дыхания и анализирует их вариабельность. Для стимуляции регуляторных механизмов сердечно-сосудистой системы использовали функциональный тест с увеличением мертвого дыхательного пространства и контролируемое дыхание с частотой 0,1 Гц.

Наши исследования показали, что наибольшей чувствительностью к условиям моделированной гипогравитации обладают показатели вариабельности

We studied changes in the cardiovascular system (CVS) caused by simulated hypogravity (7- and 21-day ortho- and antiorthostatic hypokinesia (bedrest) at different angles). The aim of the experiment was selection of informative CVS parameters most sensitive to the simulated conditions. We used spiroartheriocardiorythmograph (SACR, Intox, Russia) that can simultaneously and continuously record respiration, electrocardiogram, and blood pressure. The instrument records more than 26 physiological parameters of CVS. ECG parameters (R-R, P, QRS ets.), systolic and diastolic pressure in each cardiocycle, and breathing volumes and their variability were measured and analized using the original software. To stimulate mechanisms of CVS regulation, we used functional tests with increased respiratory «dead space» and controlled respiration at a frequency of 0.1 Hz.

It was found that BP variability indexes in functional tests were most sensitive to simulated hypogravity: significant differences in groups with varying degrees of orthostatic hypokinesia (+ 9.6° and + 15°) were observed starting from the first week of the experiment. By day 21, the most pronounced changes in the total spectral power of diastolic BP variability were noted in the group exposed to constant antiorthostasis. This parameter significantly surpassed the corresponding

артериального давления. Уже на первой неделе исследования наблюдали значимые различия в этих показателях между группами с ортостатической гипокинезией +9,6° и +15°. Наиболее выраженные изменения в общей мощности спектра вариабельности диастолического давления наблюдали к 21-му дню в группе с постоянным антиортостатическим положением. В ней этот параметр был значительно выше аналогичного в группах с более мягкими условиями гипокинезии. Значительное повышение мощности низкочастотной компоненты вариабельности диастолического давления наблюдали в группах как с антиортостатической, так и с ортостатической гипокинезией. В условиях гипогравитации включаются дополнительные механизмы регуляции сердечно-сосудистой системы, что и отражается на вариабельности периферического артериального давления, особенно диастолического. Наши данные четко показывают, что вариабельность диастолического давления зависит от выраженности и продолжительности гипогравитации.

value in the groups with milder conditions. A considerable increase in the low-frequency component of diastolic BP variability was detected both in groups exposed to severe antiorthostasis and orthostasis. Under conditions of hypogravity, additional mechanisms of CVS regulation are activated, which has an impact on variability of peripheral BP, and especially diastolic BP. Our data shows that diastolic BP variability clearly depends on the degree and duration of hypogravity.

В условиях космических полетов и при их моделировании происходят процессы адаптации к микрогравитации и гипокинезии. Наиболее выраженным эффектом микрогравитации на организм человека является смещение жидких сред в верхнюю часть тела. Это запускает механизмы, обеспечивающие длительную адаптацию к новым условиям, что в первую очередь отражается на работе сердечно-сосудистой и дыхательной систем и обусловливает необходимость их постоянного мониторинга при микрогравитации. Для оценки адаптационных процессов сердечно-сосудистой и дыхательной систем используют показатели вегетативного баланса и активности симпатической и парасимпатической регуляции, обеспечивающих процессы адаптации к изменениям окружающей среды, в частности к невесомости [15; 16; 22].

Наиболее часто вегетативный баланс сердечно-сосудистой системы оценивается по вариабельности сердечного ритма (ВСР) (интервалов R–R). Но осцилляции сердечного ритма тесно связаны с частотой дыхания, и обе эти системы в свою очередь обусловливают вариабельность артериального давления (ВАД) [24; 25; 27; 28; 32]. Следовательно, данные о ВСР и ВАД не могут быть корректно интерпретированы в отсутствие синхронной регистрации электрокардиограммы (ЭКГ), артериального давления (АД) и дыхания [17].

В рамках комплексного исследования, посвященного теоретическому и экспериментальному обоснованию модели физиологических эффектов пониженного уровня гравитации во время пребывания человека на лунной поверхности, моделировали гипогравитацию с помощью ортостатической гипокинезии и сравнивали ее с классической моделью невесомости – антиортостатической гипокинезией (АНОГ).

В части исследования, описанной в этой статье, мы сосредоточили внимание на анализе широкого спектра показателей сердечно-сосудистой и дыхательной систем в условиях моделирования гипогравитации для выявления наиболее значимых, характеризующих различия групп.

Пациенты и методы

Исследования по воздействию ортостатической гипокинезии и АНОГ проводили на добровольцах в условиях стационара [4]. Проведены два исследования: 7-дневное и 21-дневное. Предварительно процедуры и методики исследований были рассмотрены Комиссией по биомедицинской этике при Федеральном научно-клиническом центре специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий ФМБА России (ФНКЦ ФМБА России), а от испытателей, принимавших участие в исследованиях, получено письменное информированное согласие.

В 7-дневном исследовании участвовали 8 испытателей (мужчины в возрасте 19–39 лет), которые были разделены на две группы по 4 человека. Воздействие заключалось в нахождении испытателей на постельном режиме с положительным углом наклона тела относительно горизонтальной оси непрерывно в течение 7 суток (7-суточная ортостатическая гипокинезия). Первая группа получила название «ОГ +9,6°», так как испытатели данной группы находились на протяжении 7 суток с углом наклона кровати +9,6°. Вторая группа получила название «ОГ +15°» по аналогии с первой (рис. 1).

В 21-дневном исследовании участвовали 11 испытателей (мужчины в возрасте 19–39 лет), которые были разделены также на две группы. Испытатели первой группы (5 человек) на протяжении 21 суток находились на постельном режиме в условиях АНОГ с углом наклона тела относительно горизонтальной оси −6° (группа «АНОГ»). Группа «АНОГ» моделировала полет в невесомости до Луны и дальнейшее нахождение на окололунной орбите. Вторая группа (6 человек) получила название «Селена», в ней моделировали полет до Луны и дальнейшее нахождение испытателей на спутнике Земли. Испытатели данной группы находились на постельном режиме в антиортостатическом положении с углом наклона тела относительно горизонтальной оси −6° до 6-х суток с начала постельного режима с последующим чередованием ортостатического положения с углом наклона тела +9,6° на дневной период (с 7 до 23 часов) и горизонтального (0°) положения на ночной период (с 23 до 7 часов) – с 6-х по 21-е сутки постельного режима (рис. 2).

Спироартериокардиоритмография: принцип и аппаратное обеспечение. Использованный в настоящем исследовании метод индикации индивидуальной функциональной достаточности сердечно-сосудистой системы отличается от существующих аналогов тем, что регистрация сердечного, сосудистого и дыхательного ритмов производится одновременно. Все измерения проводили с помощью спироартериокардиоритмографа (САКР) («Интокс», Россия), рекомендованного Минздравом России к применению в медицинской практике (регистрационное свидетельство № 29/03020703/5869-04). Объединение трех известных методов физиологических исследований в единый аппаратный комплекс позволяет достичь принципиально нового качества измерений, а именно одновременной регистрации ВСР и ВАД на различных стадиях дыхательного акта. Только в таком виде методика позволяет непосредственно рассчитывать такие важные функциональные параметры, как соот-

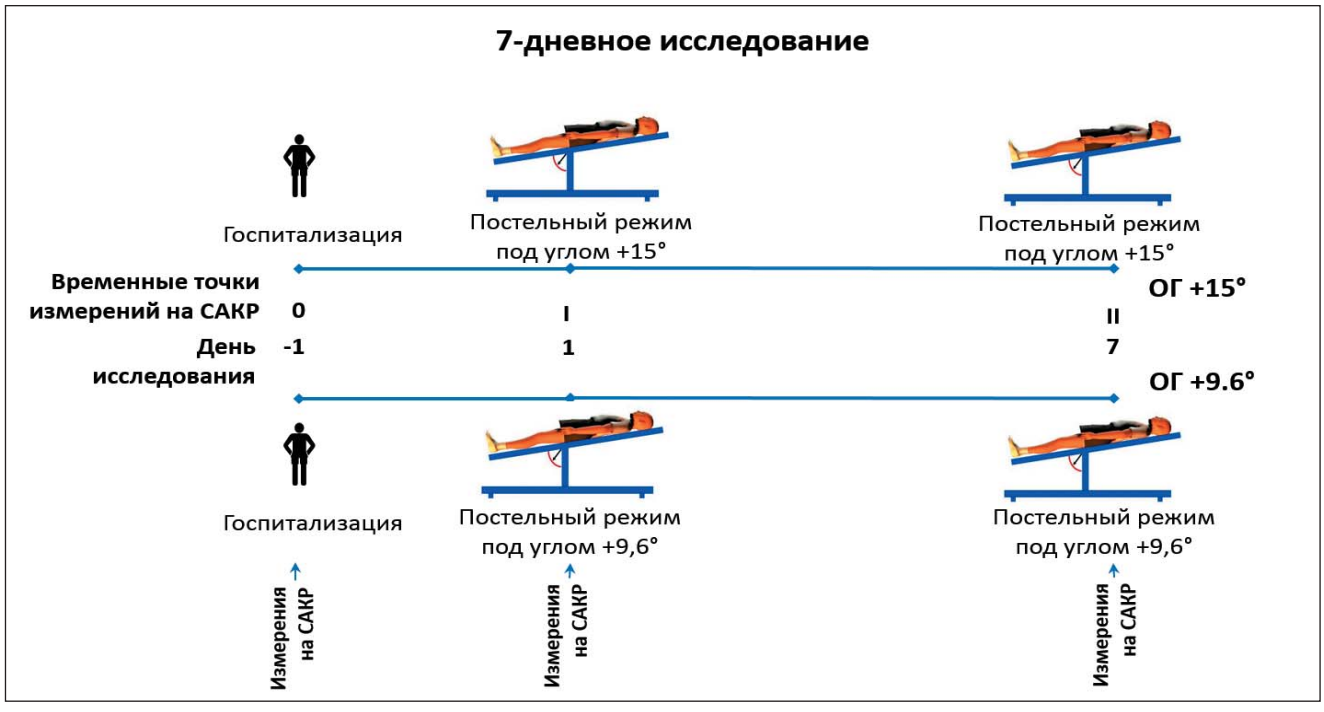


Рис. 1. Схема 7-дневного исследования

ношение симпатических и парасимпатических ветвей вегетативной регуляции сердечного ритма и АД, интегрированные значения интервалов ЭКГ, вентиляционные параметры легких, минутный объем кровообращения, величина барорефлекса. Это позволяет оценить индивидуальный санотип сердечно-сосудистой системы и спрогнозировать адаптивные возможности организма.

ЭКГ записывали в первом стандартном отведении в течение 2 минут. Амплитудно-временные параметры PQRST-комплекса и ВСР оценивали с помощью статических, геометрических и спектральных методов. ВСР анализировали с помощью простого преобразования Фурье, получая кривую распределения спектра частотных изменений сердечного ритма. Рассчитывали общую мощность ВСР (TP) и три стандартные составляющие спектра: очень низкочастотные колебания (VLF, 0–0,04 Гц), низкочастотные (LF, 0,04–0,15 Гц) и высокочастотные (HF, 0,15–0,4 Гц). Рассчитывали нормализованные значения для этих величин (LF*n*, HF*n*) как долю от суммы всех компонентов и индексы вегетативного баланса (AB=LF/HF) и централизации (C=(VLF+LF)/HF).

Периферическое АД регистрировали на фаланге среднего пальца руки по методу Пеназа непрерывно в течение 2 минут. Оценивали, как абсолютные значения систолического (САД) и диастолического (ДАД) давления, так и вариабельность этих составляющих АД. Аналогично ВСР рассчитывали общую мощность спектра (общую мощность систолического (TPS) и диастолического (TPD) давления) и их частотные составляющие (VLFS/D, LFS/D, HFS/D). Существующие зарубежные аналоги – Finapress Medical System [31] и его портативная модификация Portapress [30], производимые TNO (the Netherlands), не имеют спирографического блока, что поднимает САКР на принципиально новый уровень для оценки частотных составляющих сердечного ритма и АД.

Условия и порядок проведения исследований на приборе САКР.

В 7-дневном исследовании. Первое обследование проводили за 1 сутки до перевода испытателей на постельный режим, далее – в 1-е и 7-е сутки постельного режима (временные точки 0, I, II соответственно) (см. рис. 1). Все измерения выполняли в утренние часы в диапазоне от 9 до 11 часов.

В 21-дневном исследовании. Первые обследования проводили за 2 суток до начала

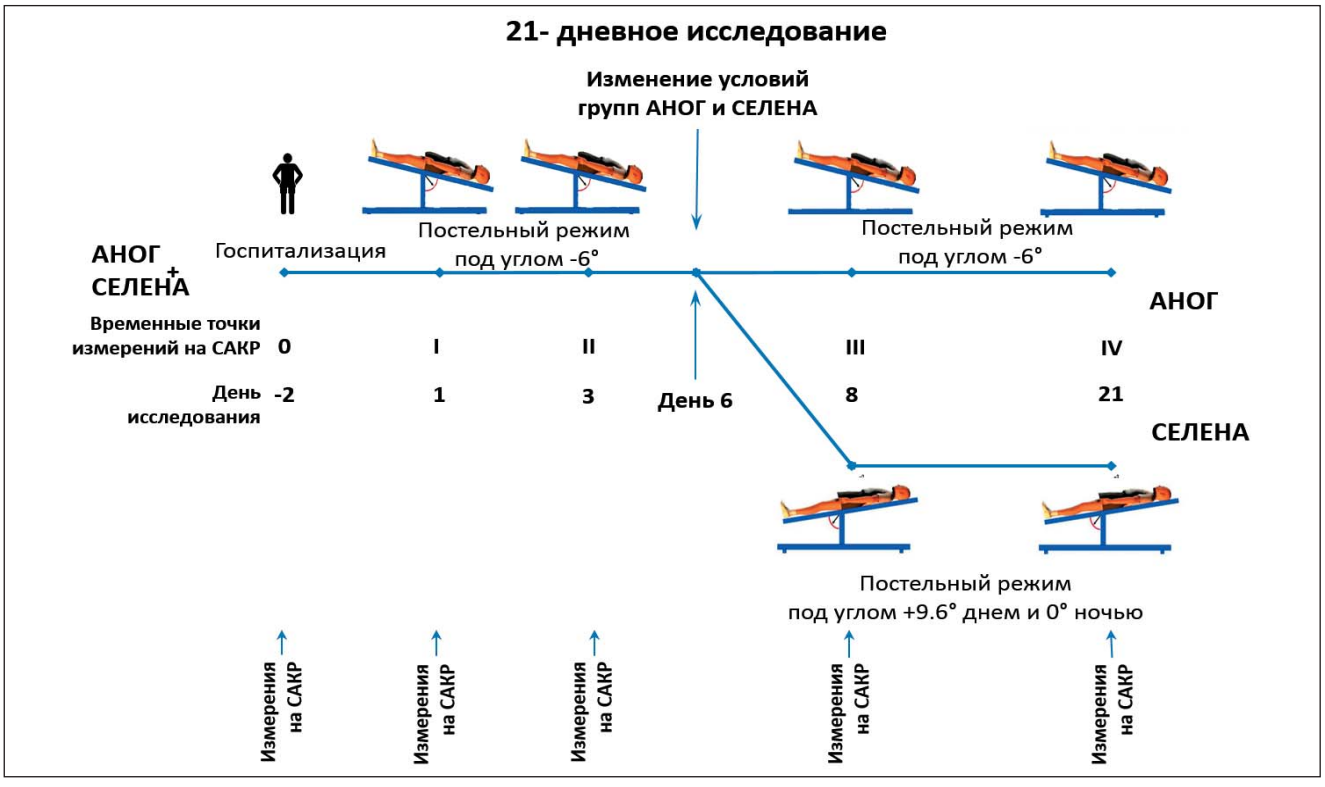


Рис. 2. Схема 21-дневного исследования

нахождения испытателей в условиях АНОГ. Далее обследования выполняли в 1-е сутки, а затем – на 3-и, 8-е и 21-е сутки постельного режима (временные точки 0, I, II, III, IV соответственно) (см. рис. 2). Во все эти дни обследование проводили утром в 9–11 часов. Стоит отметить, что для испытателей группы «Селена» это было через 2–4 часа после перевода из горизонтального положения в ортостатическое (+9,6°) с 6-х по 21-е сутки постельного режима.

Обследование испытателей проводили в положении лежа (либо горизонтально, либо под тем углом, под которым испытатель должен был находиться в данный момент) (рис. 3). Сеанс обследования включал три непрерывных последовательных измерения на приборе САКР: 1) без использования дыхательной маски и соответственно без регистрации дыхания («маска–») – 2 минуты; 2) с использованием дыхательной маски (функциональная проба с увеличенным «мертвым пространством», которая, по данным А.И. Труханова с соавт. [11], ведет к перераспределению спектра ВСР в сторону увеличения высокочастотной составляющей – HF) и с регистрацией дыхания («маска+») – 2 минуты; 3) с функциональной дыхательной пробой или управляемым дыханием с частотой 0,1 Гц ($УД_6$) с использованием дыхательной маски и регистрацией дыхания – 2 минуты. Дыхание с частотой 6 раз в минуту вызывает значимое изменение АД за счет депонирования крови в легких при вдохе и последующую отчетливую барорефлекторную реакцию частоты сердечных сокращений (ЧСС) и АД [14].

Статистический анализ. Полученные данные представлены в виде средних значений ($m \pm SE$) или медианы с процентилями 25–75%. Для оценки межгрупповых различий использовали либо дисперсионный анализ для повторяющихся измерений (repeated measures ANOVA), либо непараметрический тест Манна–Уитни (Mann–Whitney test) при отсутствии нормального распределения в анализируемых данных. Различия между начальными измерениями и последующими проводили с помощью непараметрического метода Вилкоксона (Wilcoxon matched-pairs test).



Рис. 3. Пример обследования на приборе САКР

Результаты исследования

Проанализирован широкий спектр показателей сердечно-сосудистой и дыхательной систем. Обнаружено, что наиболее значимые изменения в ответ на воздействие гипогравитации наблюдаются в периферическом АД.

Межгрупповые различия были получены для показателей АД и его вегетативной регуляции в 21-дневном исследовании (между группами «АНОГ» и «Селена»).

На рисунке 4 продемонстрированы значимые межгрупповые различия в динамике показателей ДАД и САД при использовании дисперсионного анализа ANOVA для повторяющихся измерений.

Значимость различий для ДАД составила p=0,002, а для САД – p=0,02.

Необходимо было понять, в каком периоде исследования эти различия были действительно значимы. Для этого мы исключили межгрупповые различия, возникшие еще до изменения положения тела в двух группах (т.е. до 6-го дня). Измерения параметров сердечно-сосудистой и дыхательной систем проводили в следующих временных точках: 0 – за 2 суток до укладки испытуемых, I – 1-е сутки исследования, II – 3-и сутки, III – 8-е сутки, IV – 21-е сутки (см. схему исследования). Период обследования разделили на два интервала: «А» – с точки I до точки II (включительно), когда угол наклона одинаков в обеих группах и равен –6°, «В» – с III по IV временную точку, когда углы наклона и соответственно условия для групп «АНОГ» и «Селена» различаются.

Результаты анализа представлены в таблице. Видно, что значимые различия в динамике ДАД проявляются в интервале «В» и

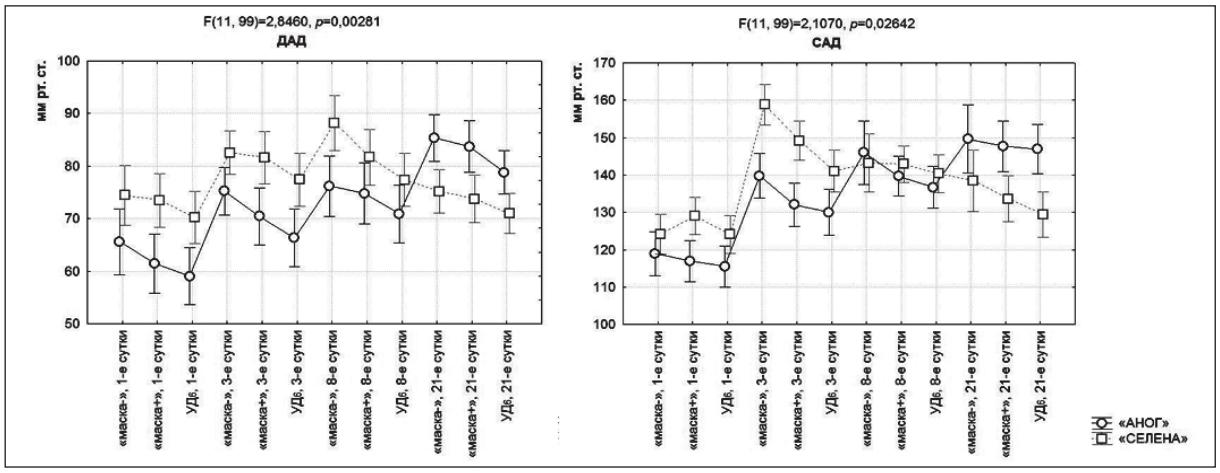


Рис. 4. Динамика артериального давления при моделировании гипогравитации
По оси ординат – абсолютные значения АД, по оси абсцисс – дни обследований

отсутствуют в интервале «А», когда испытатели находились в равных условиях.

Уровень САД в группах «АНОГ» и «Селена», видимо, начинает меняться быстрее ДАД при изменении положения с антиортостатического на ортостатическое в период между 3-ми и 8-ми сутками постельного режима, что видно при анализе межгрупповых различий САД с 3-х по 21-е сутки. Дисперсионный анализ ANOVA показывает достоверные различия между группами «АНОГ» и «Селена» в этот временной период ($F(8,72)=2,4117$, $p=0,0229$).

Исходя из этого результата, мы проанализировали изменения вегетативной регуляции АД, оценивая вариабельность ДАД и САД с помощью спектрального анализа ритмов АД. На рисунке 5 представлена динамика общей мощности спектров ДАД и САД за весь период исследования.

На рисунке 5 видно значимое увеличение общей мощности спектра вариабельности ДАД (TPD) на 21-е сутки обследования в группе «АНОГ», условия которой не менялись и были более жесткими по сравнению с группой «Селена». Это повышение TPD наблюдалось на 21-е сутки как без дыхательной маски, так и в маске, а особенно при управляемом дыхании, в отличие от 1-х и 3-х суток обследования внутри этой же группы «АНОГ». Значимых отличий общей мощности вариабельности САД (TPS) обнаружено не было.

Далее представлены результаты анализа межгрупповых и внутригрупповых различий частотных составляющих ВАД (HFD/S, LFD/S, VLFD/S) при утренних измерениях.

Анализируя HFS/D, можно увидеть, что значимые различия (как внутригрупповые, так и межгрупповые) наблюдаются для HFS (рис. 6). HFS значительно повышается уже к 8-м суткам в группе «АНОГ» по сравнению как с обследованием за 2 суток до начала исследования (временная точка 0), так и с группой «Селена». Особенно это заметно при обследовании без дыхательной маски («маска–»). Аналогичные изменения видны и в HFD, но они статистически недостоверны.

Анализируя LFS/D (рис. 7), можно увидеть, что значимые различия (как внутригрупповые, так и межгрупповые) есть только в LFD.

Видно, что LFD значимо повышается к 21-м суткам в группе «АНОГ» по сравнению

Показатели межгрупповых различий по дисперсионному анализу ANOVA при сравнении АД до и после изменения условий АНОГ (по абсолютным значениям АД)

Группы сравнения	Временной период		
	Весь период (1–21-е сутки)	Интервал «А» (1–3-и сутки)	Интервал «В» (8–21-е сутки)
$ДАД_{АНОГ}$ vs $ДАД_{СЕЛЕНА}$	$F(11,99)=2,8460$, $p=0,00281$*	$F(5,45)=0,12573$, $p=0,98568$	$F(5,45)=4,8511$, $p=0,000124$*
$САД_{АНОГ}$ vs $САД_{СЕЛЕНА}$	$F(11,99)=2,1070$, $p=0,02642$*	$F(5,45)=0,45271$, $p=0,80908$	$F(5,45)=1,2787$, $p=0,28977$
Примечание: * $p=0,0229$.			

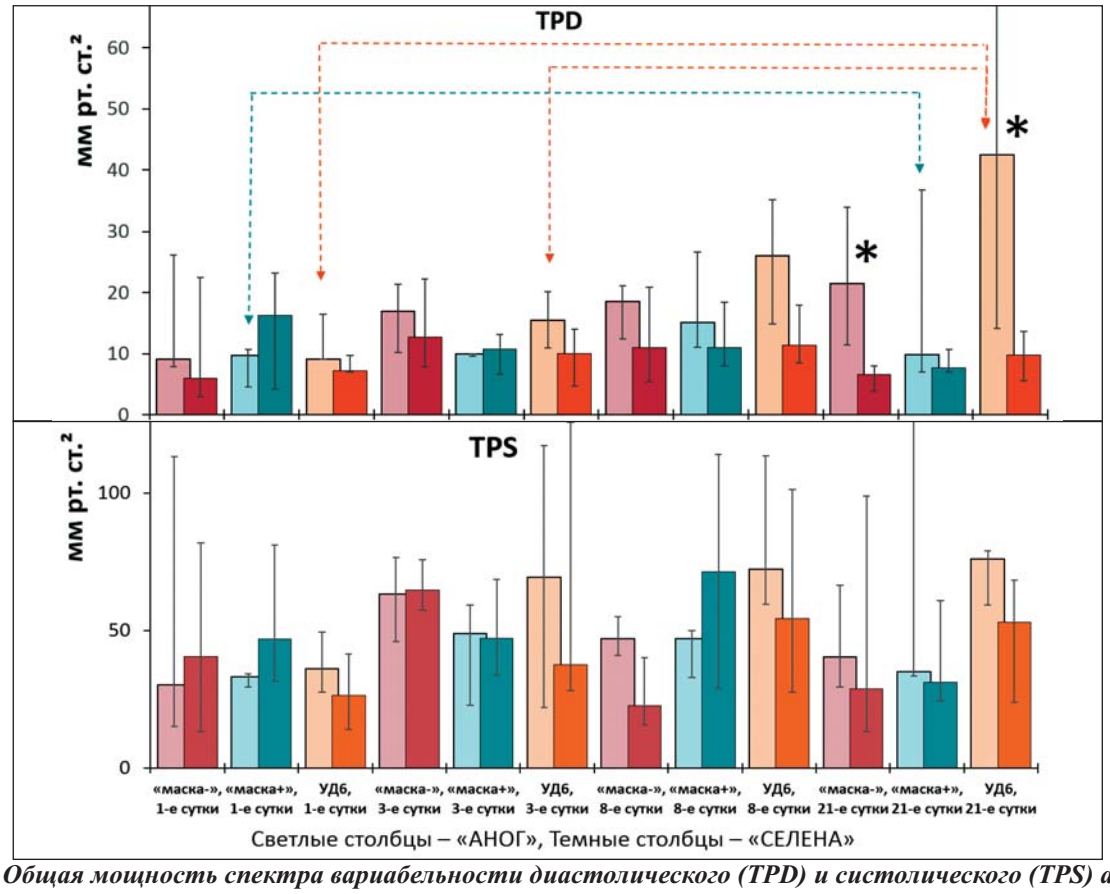


Рис. 5. Общая мощность спектра вариабельности диастолического (TPD) и систолического (TPS) артериального давления за весь период исследования. По оси ординат – значения общей мощности спектра АД, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Whitney test; - - - $p<0,05$, внутригрупповые различия Wilcoxon matched-pairs test

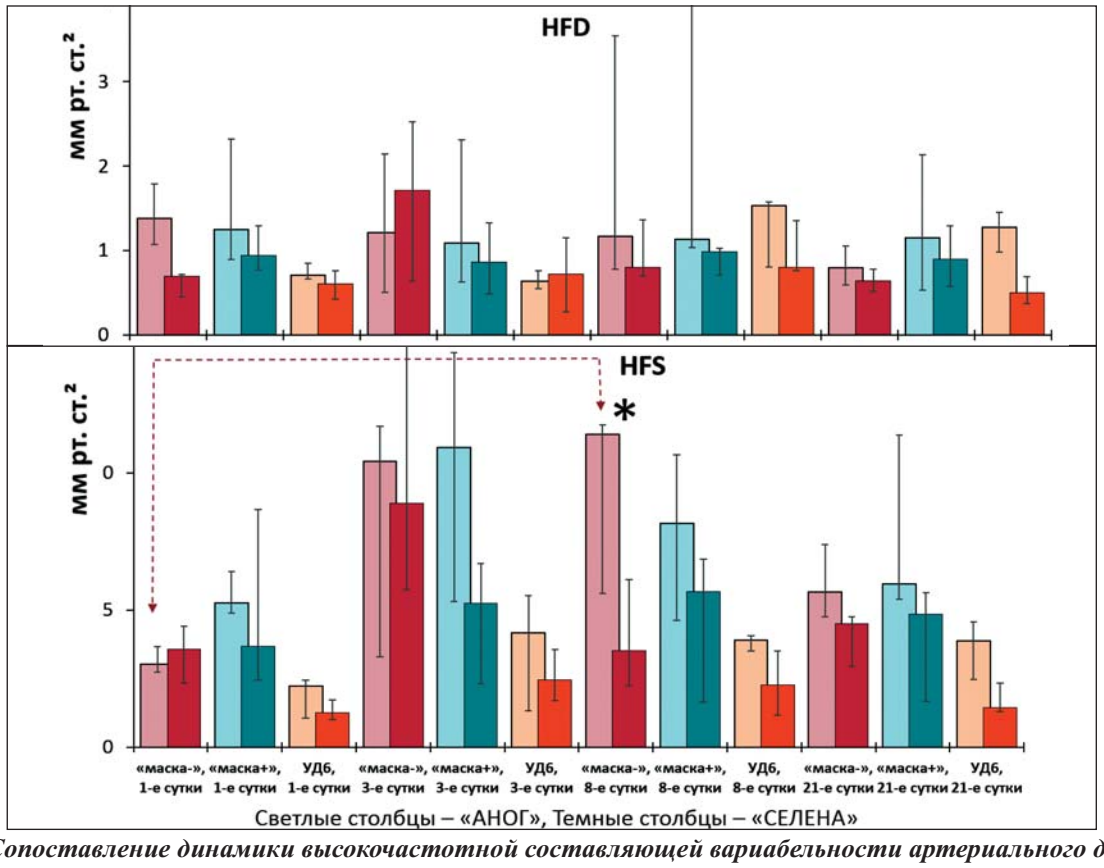


Рис. 6. Сопоставление динамики высокочастотной составляющей вариабельности артериального давления (HFS/D) при разных функциональных условиях. По оси ординат – значения высокочастотной составляющей (HF) общей мощности спектра АД, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Whitney test, - - - $p<0,05$, внутригрупповые различия Wilcoxon matched-pairs test

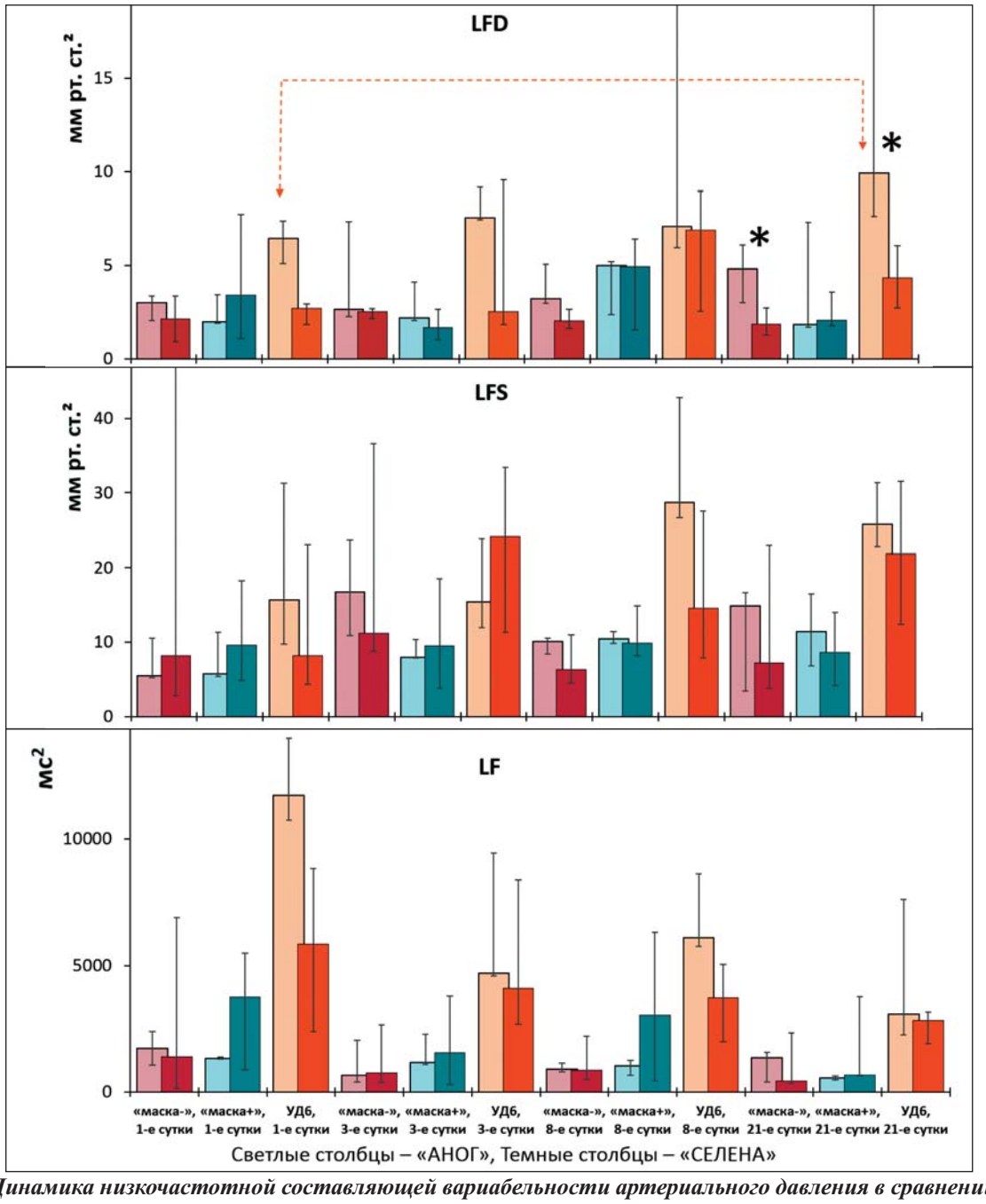


Рис. 7. Динамика низкочастотной составляющей вариабельности артериального давления в сравнении с низкочастотной составляющей кардиоритма. По оси ординат – значения низкочастотных составляющих (LF) общей мощности спектра АД и сердечного ритма, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Withney test, - - - $p<0,05$, внутригрупповые различия Wilcoxon matched-pair test

как с 1-ми сутками исследования (временная точка I), так и с испытателями группы «Селена». Особенно это выражено при функциональной пробе с управляемым дыханием.

Для диапазона VLFD/S (рис. 8) наблюдается значимое увеличение VLFS к 21-м суткам исследования в группе «АНОГ» по сравнению как с 1-ми сутками исследования в этой же группе, так и с группой «Селена», достигая значимых значений при обследовании без дыхательной маски.

В 7-дневном исследовании, чтобы изменения показателей не маскировались индивидуальной вариативностью, были использованы приведенные данные (на рисунках 9 и 10 показаны отклонения параметров от показателей в 1-е сутки исследования).

В этом исследовании при сравнении испытателей из групп ортостатической гипокинезии с углом наклона +9,6° и углом наклона +15° значимые межгрупповые различия наблюдались в показателях вегетативной регуляции как САД (рис. 9), так и ДАД (рис. 10).

На рисунках 9 и 10 видно повышение приведенных значений общей мощности спектра вариабельности как САД (TPSn), так и

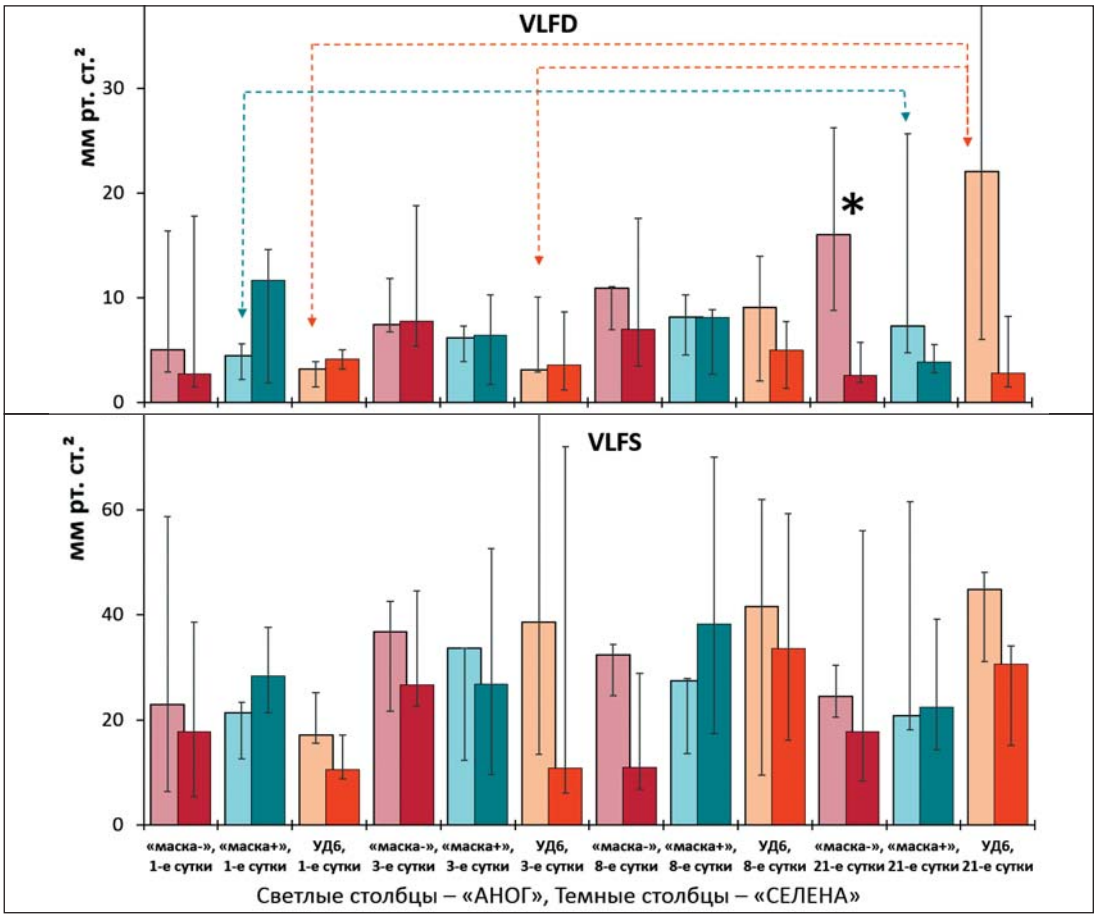


Рис. 8. Динамика очень низкочастотной составляющей вариабельности артериального давления
По оси ординат – значения очень низкочастотной составляющей (VLF) общей мощности спектра АД, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Whitney test, - - - $p<0,05$, внутригрупповые различия Wilcoxon matched-pair test

ДАД (TPDn) для группы +9,6° по сравнению с группой +15°, особенно при функциональной пробе с дыхательной маской. Значимые различия в этом исследовании наблюдали в ВАД только при функциональных пробах (с дыхательной маской и управляемое дыхание), поэтому в дальнейшем обсуждаются только эти показатели (см. рис. 9, 10).

Наиболее значимый вклад в повышение общей мощности вариабельности САД для группы +9,6° вносит высокочастотная (HFSn) и в пробе с дыхательной маской – очень низкочастотная (VLFSn) составляющие (см. рис. 9). В повышение вариабельности ДАД для группы +9,6° наибольший вклад вносят высокочастотная (HFDn) и низкочастотная (LFDn) составляющие (см. рис. 10). Эти данные предполагают участие различных уровней регуляции САД и ДАД в этом вегетативном сдвиге.

Обсуждение результатов исследования

Наиболее выраженную мощность спектра вариабельности САД и яркие изменения этого параметра в ответ на ортостатическое воздействие отмечали А.П. Исаев с соавт. при обследовании юных спортсменов [7]. При этом общая мощность колебательной активности последовательно нарастала только при регистрации амплитуды пульсации мелких сосудов на пальце ноги как при активном, так и при пассивном ортостазе, в отличие от разнонаправленности спектров колебаний крупных сосудов (сосудов голени и аорты) в ответ на активный или пассивный ортостаз. Это хорошо согласуется с полученными нами данными по ВАД при изменении условий хронического ортостаза (смене угла или переходе из антиортостатического положения в ортостатическое) и при схожих условиях измерения АД на сосудах пальца руки в положении лежа.

Ритмические изменения САД и соответственно параметр TPS в основном связаны с вариабельностью насосной функции сердца [29] и TP сердечного ритма как основного показателя этой вариабельности, что хоро-

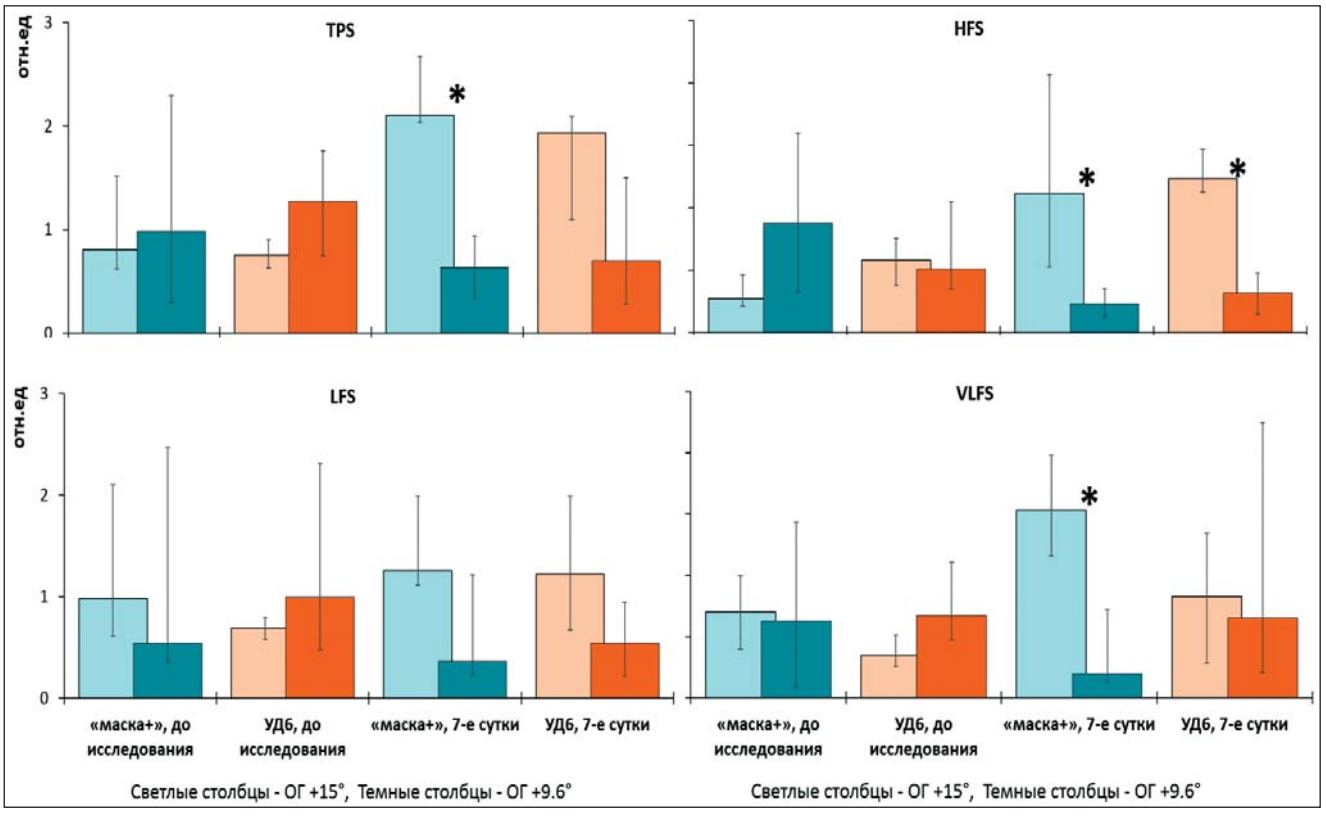


Рис. 9. Общая мощность спектра вариабельности систолического давления и ее составляющие HFS, LFS и VLFS в начале и в конце исследования при функциональных пробах с дыхательной маской

По оси ординат – приведенные значения общей мощности спектра САД и ее составляющих, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Whitney test

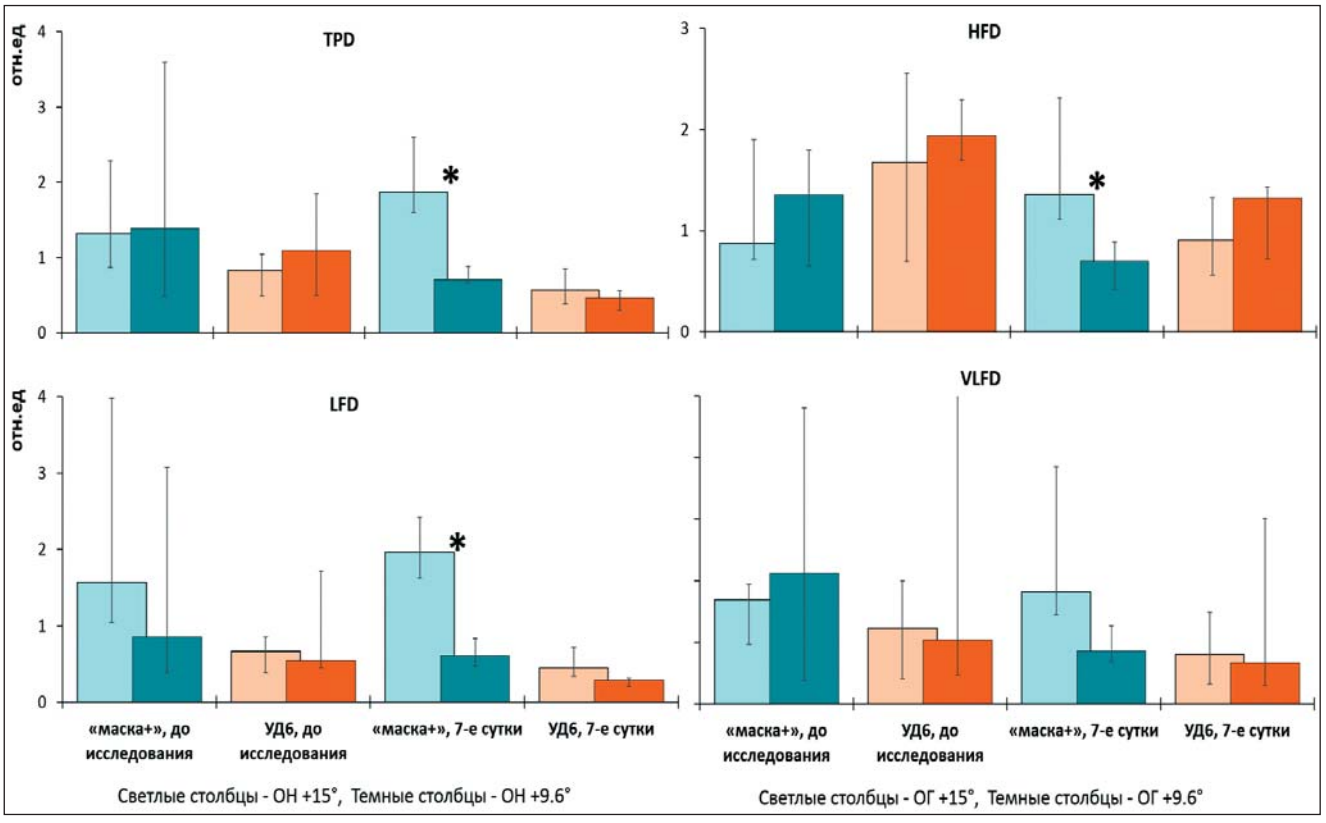


Рис. 10. Общая мощность спектра вариабельности диастолического давления и ее составляющие HFD, LFD и VLFD в начале и в конце исследования при функциональных пробах с дыхательной маской

По оси ординат – приведенные значения общей мощности спектра ДАД и ее составляющих, по оси абсцисс – дни обследований; * $p<0,05$, межгрупповые различия Mann–Whitney test

шо объясняет отсутствие выраженных однонаправленных изменений в TPS (см. рис. 5) испытателей и согласуется с тем, что мы не выявили значимых внутри- и межгрупповых различий в TP их сердечного ритма на протяжении всего 21-дневного исследования. Это может объясняться индивидуальной вариативностью изменений сердечного ритма испытателей в условиях АНОГ и ортостатической гипокинезии, в частности TP и других показателей вариабельности HR [3].

Высокочастотные модуляции АД в большей степени определяют систолическую составляющую ВАД (HFS) по сравнению с диастолической (HFD). Известно, что этот частотный диапазон в основном определяется частотой дыхания и через блуждающий нерв влияет на сердечный ритм, вызывая смещение спектра вариабельности в высокочастотную область (HF), что в свою очередь отражается на вариабельности САД в том же частотном диапазоне (HFS) [9]. HFS достигало значимых межгрупповых и внутригрупповых различий только на 8-е сутки 21-дневного исследования, но при этом не было зафиксировано достоверных изменений HF сердечного ритма из-за большой индивидуальной вариативности. Схожая картина наблюдалась и в 7-дневном исследовании.

Значительное повышение интегрального показателя вариабельности ДАД (TPD), но не САД, при длительном АНОГ хорошо согласуется с фактом, что этот показатель тесно связан с тонусом, ригидностью и миогенной активностью гладкомышечных клеток стенки периферических сосудов [3; 20], и его значимые сдвиги (изменения) логично отражают последствия длительной АНОГ и ортостатической гипокинезии (перераспределение жидкости в организме, изменения водно-солевого баланса и т.д.) [1; 13].

Наиболее ярко и стабильно меняющейся составляющей вариабельности ДАД в разных условиях ортостаза является низкочастотная составляющая (LFD), причем в основном при дыхательных пробах (с дыхательной маской или управляемым дыханием с частотой 0,1 Гц). Составляющая колебаний кровотока или давлений на этой частоте является чувствительной к различным по природе воздействиям на организм человека [19; 33]. Физиологические механизмы медленных колебаний ЧСС и АД (в районе 0,1 Гц) неоднозначны. Ясно лишь, что медленные колебания ЧСС – явление вторичное, рефлекторное и вряд ли может определяться какой-либо одной причиной [18]. Более того, из работ A. Cevese et al. видно, что колебания АД определяются изменениями сопротивления сосудов, а не изменениями частоты и сократимости сердца [21]. Колебания на частоте 0,1 Гц у человека выявляются и в вариабельности кровенаполнения микроциркуляторного русла кожи [8], и, по мнению некоторых авторов, эти колебания на уровне капиллярного русла имеют исключительно миогенную природу [5; 10]. В работе R. Cooley et al. показано, что происхождение медленных волн R–R-интервалов и АД различно [23]. Все это хорошо согласуется с тем, что в своих исследованиях мы не наблюдали таких же хорошо выраженных межгрупповых различий (при сравнении групп «АНОГ» и «Селена» или «ОГ +9,6°» и «ОГ +15°») в спектрах мощности вариабельности ЧСС в отличие от вариабельности АД, особенно диастолического. Наиболее ярко данные межгрупповые различия проявлялись в составляющей LFD (см. рис. 7), когда мы регулируемым дыханием задавали ритм с частотой 0,1 Гц, который и соответствует LF-диапазону. Эти различия, скорее всего, связаны с длительным перераспределением объемов крови в организме и изменением периферического (капиллярного) кровенаполнения [13], а не с ритмическими изменениями ЧСС. Остальные же сигналы (афферентные от венозных сосудов; импульсации интерорецепторов, реагирующих на смещение органов брюшной полости и сигналы от вестибулярного аппарата с его мощными связями с симпатической нервной системой), видимо, способствуют повышению мощности медленных волн, как АД, так и ЧСС [14; 26; 34], что мы наблюдаем в LF сердечного ритма (см. рис. 7), но не отражают различий состояния испытуемых с разной степенью хронического ортостаза.

Межгрупповые изменения ВАД в диапазоне очень низких частот (VLFS/D) в наших исследованиях противоречивы, как противоречивы и гипотезы происхождения волн изменения ЧСС и АД в этом диапазоне [13].

Эти изменения трудно отнести на счет прямого влияния хронического анти- и ортостаза. Единственное, если учитывать гипотезу Р.М. Баевского с соавт. о надсегментарной (гипоталамической и более высокого уровня) природе этих колебаний [2; 6; 12], то можно предположить, что они связаны с психоэмоциональным напряжением испытателей, которое отражается на сердечно-сосудистой системе, но это требует дальнейшего (дополнительного) анализа.

В заключение можно отметить, что наиболее чувствительными оказались показатели ВАД, которые различались уже в первую неделю между группами с разной степенью ортостатической гипокинезии (группа +9,6° и группа +15° 7-дневного исследования) при использовании функциональных проб. Это свидетельствует о высокой информативности упомянутых параметров при исследованиях в условиях АНОГ и ортостатической гипокинезии. К 21-м суткам исследования отмечали выраженные изменения в TPD в группе испытателей, находившихся постоянно в условиях АНОГ. Значения этого показателя значимо превышали таковые у испытателей с более мягкими условиями в группе «Селена».

В условиях гипогравитации включаются дополнительные механизмы регуляции сердечно-сосудистой системы, что и отражается на вариабельности периферического АД, особенно диастолического. Это видно по значительному увеличению LFD в группах с более жесткими условиями анти- и ортостаза («АНОГ» и «ОГ +15°»).

Механизмы регуляции, влияющие на САД и ДАД в условиях моделирования гипогравитации, различны, по крайней мере отчасти. Вегетативная регуляция САД меняется раньше (уже к 7–8-м суткам) и в основном отражается на HFS, а к 2-м суткам ее дисбаланс нивелируется (в отличие от LFS).

Наши данные четко показывают, что вариабельность ДАД зависит от выраженности и продолжительности гипогравитации.

Литература

1. Баевский Р.М., Баранов В.М., Танк Й. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма и оценка состояния миокарда в космическом полете при тестах с фиксированным темпом дыхания и задержкой дыхания // Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и практическое применение: Тезисы докладов IV всероссийского симпозиума с международным участием, 19–21 ноября 2008 г. Ижевск, 2008. С. 27.
2. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984.
3. Баевский Р.М., Фунтова И.И., Черникова А.Г. Проблемы изучения вариабельности сердечного ритма в космической медицине // Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и практическое применение: Тезисы докладов IV всероссийского симпозиума с международным участием, 19–21 ноября 2008 г. г. Ижевск, 2008. С. 24.
4. Баранов М.В., Катунцев В.П., Шпаков А.В., Баранов В.М. Метод наземного моделирования физиологических эффектов пребывания человека в условиях гипогравитации // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2015. Т. 160. № 9. С. 392–396.
5. Гриневич А.А., Танканаг А.В., Чемерис Н.К. Роль эластичности сосудов в формировании высокоамплитудных колебаний кровотока на частоте 0.1 Гц // Математическая биология и биоинформатика. 2014. Т. 9. № 2. С. 341–358.
6. Елфимов А.В., Филиппов И.В. Влияние надсегментарных отделов вегетативной нервной системы на ритм сердца: механизмы функционирования висцеральных систем. СПб.: Ин-т физиологии им. И.П. Павлова РАН, 2001. С. 118–119.
7. Исаев А.П., Кабанов С.А., Сабирьянов А.Р., Личагина С.А. Особенности вегетативной регуляции волновых процессов центральной и периферической гемодинамики юных спортсменов (на примере самбо) // Теория и практика физической культуры. 2002. № 1. С. 40–43.
8. Киселев А.Р., Беспятов А.Б., Посненкова О.М. и др. Внутренняя синхронизация основных 0,1 Гц-частотных ритмов в си-

стеме вегетативного управления сердечно-сосудистой системой // Физиология человека. 2007. Т. 33. № 2. С. 69–75.

9. Киселев А.Р., Гриднев В.И. Колебательные процессы в вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы» (обзор) // Саратовский научно-медицинский журнал. 2011. Т. 7. № 1. С. 34–39.
10. Крупаткин А.И. Колебания кровотока с частотой около 0.1 Гц в микрососудах кожи не отражают симпатическую регуляцию их тонуса // Физиология человека. 2009. Т. 35. № 2. С. 60–69.
11. Труханов А.И., Панкова Н.Б., Хлебникова Н.Н., Карганов М.Ю. Использование метода спироартериокардиоритмографии в качестве функциональной пробы для оценки состояния кардиореспираторной системы взрослых и детей // Физиология человека. 2007. Т. 33. № 5. С. 82–92.
12. Хаспекова Н.Б. Регуляция вариативности ритма сердца у здоровых и больных с психогенной и органической патологией мозга: Дисс. ... д-ра мед. наук. М., 1996. С. 217.
13. Хаютин В.М., Лукошкова Е.В. Колебания частоты сердцебиений: спектральный анализ // Вестник аритмологии. 2002. Т. 26. № 9. С. 10–21.
14. Хаютин В.М., Сонина Р.С., Лукошкова Е.В. Центральная организация вазомоторного контроля. М.: Медицина, 1977. С. 352.
15. Baevsky R.M. Noninvasive methods in space cardiology // Journal of Cardiovascular Diagnosis and Procedures. 1997. No. 14. P. 161–171.
16. Baevsky R.M., Baranov V.M., Funtova I.I. et al. Autonomic cardiovascular and respiratory control during prolonged spaceflights aboard the International Space Station // Journal of Applied Physiology. 2007. Vol. 103. No 1. P. 156–161.
17. Baevsky R.M., Funtova I.I., Diedrich A. et al. Autonomic function testing on board the ISS – update on "Pneumocard" // Acta Astronбutica. 2007. Vol. 61. No. 7–8. P. 672–675.
18. Bernardi L., Passino C., Spadacini G. et al. Arterial baroreceptors 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. Amsterdam, 1997. P. 241–252.
19. Bernardi L., Porta C., Casucci G. et al. Dynamic interactions between musical, cardiovascular, and cerebral rhythms in humans // Circulation. 2009. Vol. 119. P. 3171–3180.
20. Bertuglia S., Colantuoni A., Intaglietta M. Effects of L-NMMA and indomethacin on arteriolar vasomotion in skeletal muscle microcirculation of conscious and anesthetized hamsters // Microvascular Research. 1994. Vol. 48. P. 68–84.
21. Cevese A., Grasso R., Poltronieri R., Schena F. Vascular resistance and arterial pressure low-frequency oscillation in the anesthetized dog // American Journal of Physiology. 1995. Vol. 268. No 1. P. H7–H16.
22. Cooke W.H., Ames J.E., Crossman A.A. et al. Nine months in space: effects on human autonomic cardiovascular regulation // Journal of Applied Physiology. 2000. Vol. 89. P. 1039–1045.
23. Cooley R.L., Montano N., Cogliati C. et al. Evidence for a central origin of low-frequency oscillation in RR-interval variability // Circulation. 1998. Vol. 98. No. 6. P. 556–561.
24. Fritsch-Yelle J.M., Charles J.B., Jones M.M., Wood M.L. Microgravity decreases heart rate and arterial pressure in humans // Journal of Applied Physiology. 1996. Vol. 80. P. 910–914.
25. Julien C., Malpas S.C., Stauss H.M. Sympathetic modulation of blood pressure variability // Journal of Hypertension. 2001. Vol. 19. P. 1707–1712.
26. Michaelis M., Gцder R., Hдbler H.J., and Jдnig W. Properties of afferent nerve fibers supplying the saphenous vein in the cat // The Journal of Physiology. 1994. Vol. 474. No. 2. P. 233–243.
27. Migeotte P.F., Prisk G.K., Paiva M. Microgravity alters respiratory sinus arrhythmia and short-term heart rate variability in humans // American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology. 2003. Vol. 284. P. H1995–H2006.

28. Pitzalis M.V., Mastropasqua F., Massari F. et al. Effect of respiratory rate on the relationships between RR interval and systolic blood pressure fluctuations: a frequency-dependent phenomenon // Cardiovascular Research. 1998. Vol. 38. No. 2. P. 332–339.
29. Romanchuk A.P. The Complex approach to a multipurpose estimation of a sportsmen condition // Polysystemic approach to school, sport and environment medicine. OMICS Group eBooks, 2013. P. 54–86.
30. Schmidt T.F., Wittenhaus J., Steinmetz T.F. et al. Twenty-four-hour ambulatory non-invasive continuous finger blood pressure measurement with PORTAPRES: a new tool in cardiovascular research // Journal of Cardiovascular Pharmacology. 1992. Vol. 19. No. 6. P. 117–145.
31. Silke B., McAuley D. Accuracy and precision of blood pressure determination with the Finapres: an overview using re-sampling statistics // Journal of Human Hypertension. 1998. Vol. 12. No. 6. P. 403–409.
32. Taylor J.A., Eckberg D.L. Fundamental relations between short-term RR interval and arterial pressure oscillations in humans // Circulation. 1996. Vol. 93. P. 1527–1532.
33. Yan Y., Shen G., Xie K. et al. Wavelet analysis of acute effects of static magnetics field on resting skin bloodflow at the nail wall in young men // Microvascular Research. 2011. Vol. 82. P. 277–283.
34. Yates B.J. Vestibular influences on the autonomic nervous system // Annals of the New York Academy of Sciences. 1996. Vol. 781. P. 458–473.

Контакты:
Черепов Антон Борисович,
научный сотрудник НИИ космической медицины ФНКЦ ФМБА России.
Тел. раб.: (499) 193 28 27.
E-mai: ipmagus@mail.ru

