

# ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА И ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА НИЖНЮЮ ЧАСТЬ ТЕЛА

## FEATURES OF REGULATION OF HEART RHYTHM AND HEMODYNAMIC CHANGES IN EXPOSURE NEGATIVE PRESSURE ON THE BOTTOM PART OF THE BODY

V. Rusanov  
E. Luchitskaya  
R. Baevsky  
K. Tavakolian

*Summary.* The study presents the experimental material obtained in the experiment with the effect of negative pressure on the bottom part of the body. The strategy of adapting the mechanisms of blood circulation regulation to redistribution of blood has been analyzed.

*Keywords.* Negative pressure on the bottom part of the body, heart rate variability, adaptation.

**Русанов Василий Борисович**

К.б.н., доцент, Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем РАН  
vasilyrusanov@gmail.com

**Лучицкая Елена Сергеевна**

К.б.н., Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем РАН  
e.luchitskaya@gmail.com

**Баевский Роман Маркович**

Д.б.н., Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем РАН

**Тавокалиан Кайяр**

Университет Ванкувера, Канада

*Аннотация.* В исследовании представлен экспериментальный материал, полученный в эксперименте с воздействием отрицательного давления на нижнюю часть тела. Проанализирована стратегия адаптации механизмов регуляции кровообращения к перераспределению крови.

*Ключевые слова.* Отрицательное давление на нижнюю часть тела, вариабельность сердечного ритма, адаптация.

## Введение

**З**начение процессов перераспределения крови в организме при адаптации к воздействию невесомости и реадaptации после возвращения на Землю является одним из основных направлений космической медицины [2,3,4,5,8].

Для оценки и прогнозирования ортостатической устойчивости в длительных космических полетах, а так же для тренировки механизмов сосудистой регуляции у космонавтов перед возвращением на Землю используют воздействие отрицательного давления на нижнюю часть тела (ОДНТ). В процессе ОДНТ создается силовая нагрузка имитирующая вес, перераспределение крови и скопление ее в нижней части тела, характерное для вертикального положения на Земле [6].

Этим определяется значимость ОДНТ для оценки и прогнозирования ортостатической устойчивости и ее применение для тренировки механизмов сосудистой регуляции у космонавтов перед приземлением [7, 9,10].

В доступной литературе нами не было найдено информации о проводимых исследованиях по изучению вариабельности сердечного ритма при воздействии отрицательного давления на нижнюю часть тела. В связи с вышесказанным целью настоящего исследования явилось изучение индивидуальных особенностей реакций организма на воздействие ОДНТ и выявление характерных особенностей управления этими реакциями, которое обеспечивается не только механизмами сосудистой регуляции, но и в значительной мере зависит от деятельности сердца и состояния вегетативной нервной системы.

## Материал и методы исследования

Исследования проводились на базе лаборатории космической физиологии Университета Симона Фразера (г. Ванкувер, Канада). В исследованиях принимали участие 25 мужчин (средний возраст  $27,6 \pm 3,7$ ). Использовалось ступенчатое воздействие ОДНТ с постепенным увеличением отрицательного давления от — 20 мм. рт.ст. до — 50 мм. рт.ст.

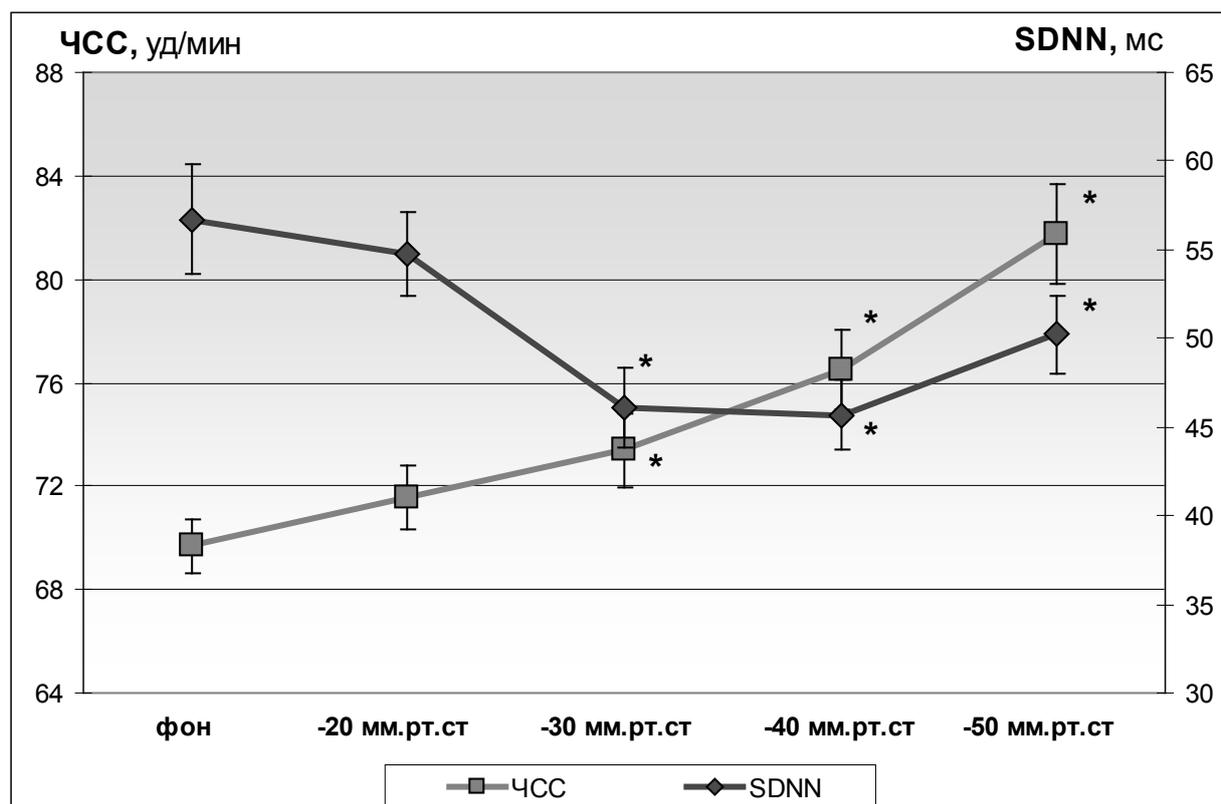


Рис. 1. Динамика показателей ЧСС и SDNN при воздействии ОДНТ  
\* — достоверные отличия ( $P < 0.05$ ) от фоновых значений

В качестве параметров, характеризующих вариабельность сердечного ритма (BCP) использовали: частоту сердечных сокращений (ЧСС), общую мощность спектра (Total power — TP); показатель вагосимпатического взаимодействия (LF/HF), индекс напряжения регуляторных систем (SI), количество пар последовательных кардиоинтервалов, отличающихся более чем на 50 мс (pNN50). Перечисленные показатели, по мнению Р.М. Баевского характеризуют вегетативный баланс, состояние подкоркового сердечно-сосудистого центра и активность высших вегетативных центров [1].

В качестве основных показателей центральной и периферической гемодинамики анализировали ударный объем (УО) и скорость распространения пульсовой волны.

Для статистической обработки результатов исследований использовались специализированные программы «Статистика» (STATISTICA 6.0) и «Microsoft Excel». Определены средние значения (M) всех полученных экспериментальных данных. Среднегрупповые значения показателей представлены с указанием ошибки репрезентативности ( $\pm m$ ) и вариационного разброса значений каждого показателя ( $\pm \sigma$ ). Сравнение данных

экспериментальной группы проводилось с использованием непараметрического теста Фридмана и критерия Вилкоксона.

### Результаты исследования

Анализ результатов исследований выявил типичную реакцию гемодинамики, которая заключалась в мобилизации функциональных резервов с активацией симпато-адреналовой системы. Процессы адаптации направлены на установление равновесия между организмом и окружающей средой. Они реализуются через работу механизмов вегетативной регуляции, о которых можно судить по динамике показателей вариабельности сердечного ритма (BCP).

Как видно из графика, представленного на рис. 1, с увеличением отрицательного давления отмечается закономерный рост частоты сердечных сокращений.

В покое среднее значение ЧСС для всех обследуемых лиц составляло  $69,99 \pm 1,06$  уд/мин. При создании отрицательного давления  $-20$  мм. рт. ст. ЧСС увеличилось на 3%, еще на такую же величину увеличилась частота сокращений сердца при увеличении давления до  $-30$  мм.

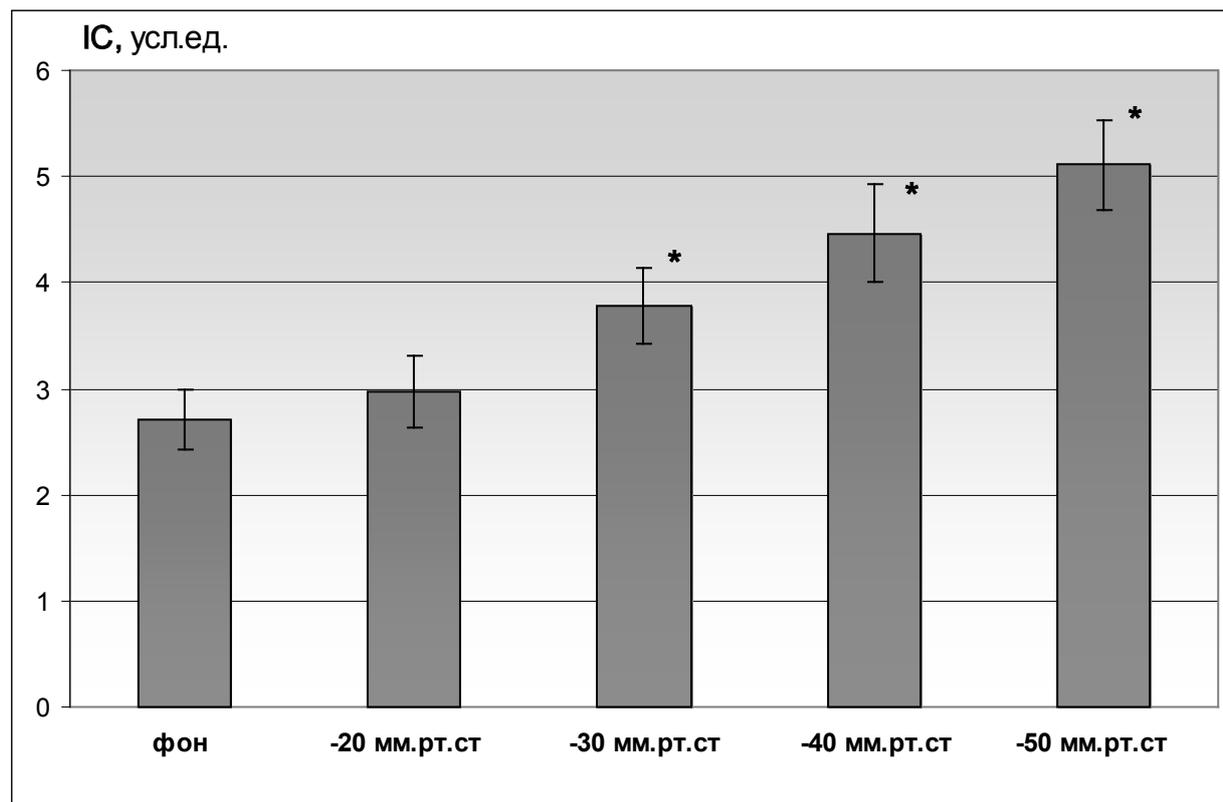


Рис. 2. Динамика показателя IC при воздействии ОДНТ.  
\* — достоверные отличия ( $P < 0.05$ ) от фоновых значений

рт.ст. С последующим ростом воздействия, увеличение ЧСС происходило значительно — при ОДНТ в  $-40$  мм. рт. ст. на  $10,2\%$ , а при воздействии  $-50$  мм. рт. ст. показатель ЧСС увеличился по сравнению с исходным на  $17,8\%$  и составил  $82,35 \pm 1,92$  уд/мин. Закономерное снижение одного из показателей variability сердечного ритма — среднего квадратичного отклонения (СКО) — SDNN происходило в пределах нормальных величин (от  $56,71$  до  $45,7$  мс). Падение этого показателя несколько стабилизировалось после воздействия в  $-40$  мм.рт.ст., благодаря включению в процесс регуляции высших вегетативных центров, что видно из динамики спектральных показателей сердечного ритма.

Во время проведения эксперимента наблюдалось постепенное смещение вегетативного баланса в сторону усиления активности симпатического звена регуляции, выражающееся почти в двукратном увеличении индекса централизации (IC) (рис. 2).

Изначально невысокие функциональные резервы регуляторных механизмов активно мобилизуются при начале воздействия, а затем величина TP постепенно падает — каждая ступень увеличения давления на  $10$  мм. рт. ст. вызывала уменьшение общей мощности спектра

в среднем на  $40\%$ . Эта особенность вместе с отмеченным резким ростом индекса централизации, свидетельствует о дополнительной мобилизации функциональных резервов за счет активации нервных центров более высоких уровней регуляции. Это подтверждается изменениями в процентном соотношении компонентов спектра. Как это видно из графика на рис. 3, при увеличении интенсивности воздействия мощность центров автономного уровня регуляции (HF) падает, а активность подкоркового сосудистого центра (LF) растет.

Значение показателя высокочастотной составляющей спектра уменьшилось на  $35\%$  от исходного значения, а величина низкочастотной составляющей выросла на  $24\%$ . Возрастала так же и активность сегментарных и надсегментарных центров регуляции энергометаболических процессов (VLF). Наибольшее значение этого показателя —  $30,57\%$  наблюдался при воздействии  $-40$  мм. рт.ст.

Следовательно, снижение функциональных резервов (об этом можно судить по резкому снижению суммарной мощности спектра) компенсируется ростом активности сегментарных и надсегментарных центров регуляции энергометаболических процессов.

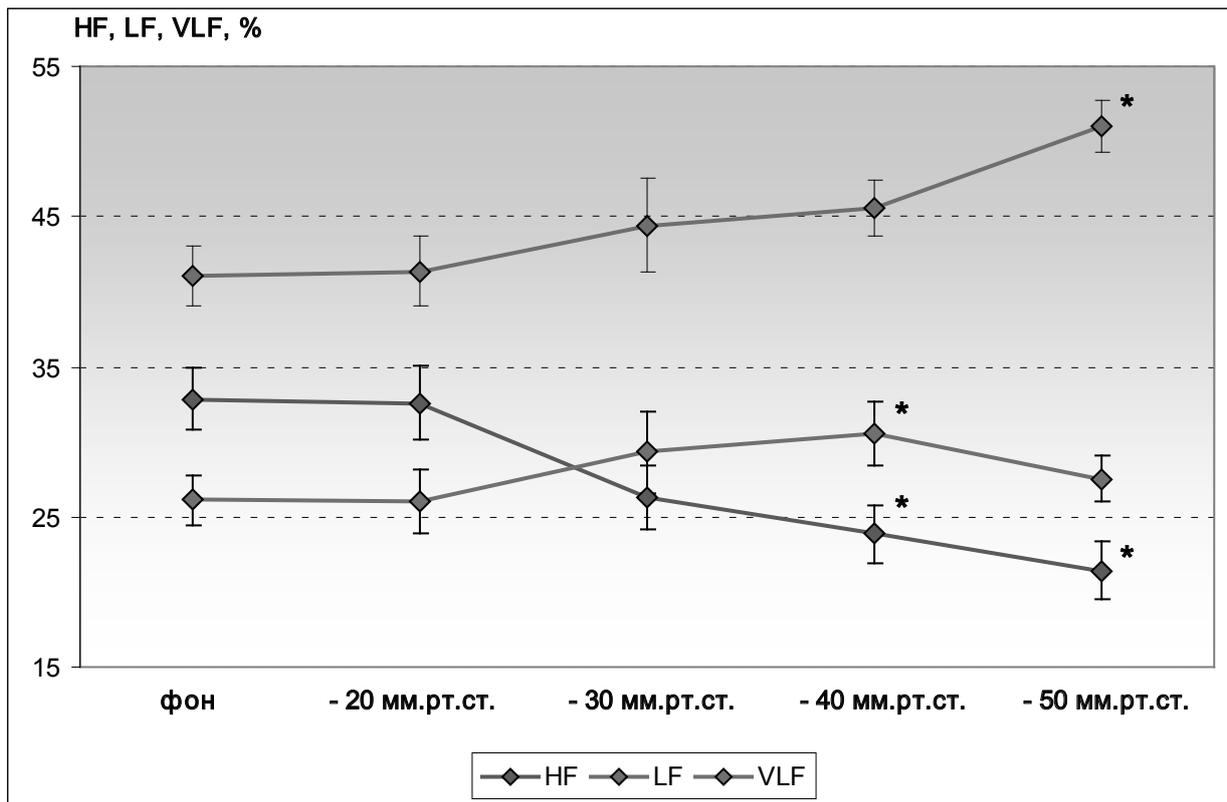


Рис. 3. Динамика изменения компонентов спектра при воздействии ОДНТ  
 \* — достоверные отличия ( $P < 0.05$ ) от фоновых значений

Динамика изменений вегетативного баланса хорошо прослеживается и при анализе активности парасимпатического звена регуляции — показателя  $rNNS50$ , значение которого постепенно падает с 22 до 8%. Т.е. комплексный анализ ряда наиболее информативных показателей анализа ВСР позволяет сделать предположение о включении в процесс адаптации подкорковых нервных центров.

Анализ показателей центральной гемодинамики выявил тенденцию к постепенному снижению ударного объема крови (рис. 4), а также сократительной функции сердца.

Показатель ударного объема, составлявший в покое, в среднем 99,23 мл/мин снизился до 59,36 мл/мин., т.е почти вдвое. Таким образом, при воздействии отрицательного давления на нижнюю часть тела, реакция центрального и регионарного кровообращения была характерной для депонирования части циркулирующей крови в зоне декомпрессии.

Изменения минутного объема в целом соответствуют динамике изменений ударного объема, однако они менее выражены ввиду компенсаторно увеличения ЧСС.

Увеличение доминирующего периода низкочастотных колебаний (показатель  $tLF$ ) является свидетельством значительного замедления барорефлекторной регуляции и причиной снижения ударного объема.

Анализируя данные времени распространения пульсовой волны можно говорить о незначительном снижении этого показателя с увеличением степени воздействия, что отражает рост сосудистого тонуса. Как показано выше, этим моментам соответствует снижение ударного объема и перестройка регуляторных механизмов.

Описанные изменения отражают общую картину адаптационного ответа организма на изменившиеся условия функционирования. Однако, реакции системы вегетативной регуляции сердечного ритма при воздействии ОДНТ характеризовались высокой степенью индивидуальности. На основе анализа динамики стресс-индекса нами было выделено несколько групп, с характерной для каждой лабильностью и выраженностью адаптационных реакций. SI, как основной показатель для деления на группы, был выбран нами, в связи с тем, что он является интегральным показателем активности симпатического звена вегетативной регуляции.

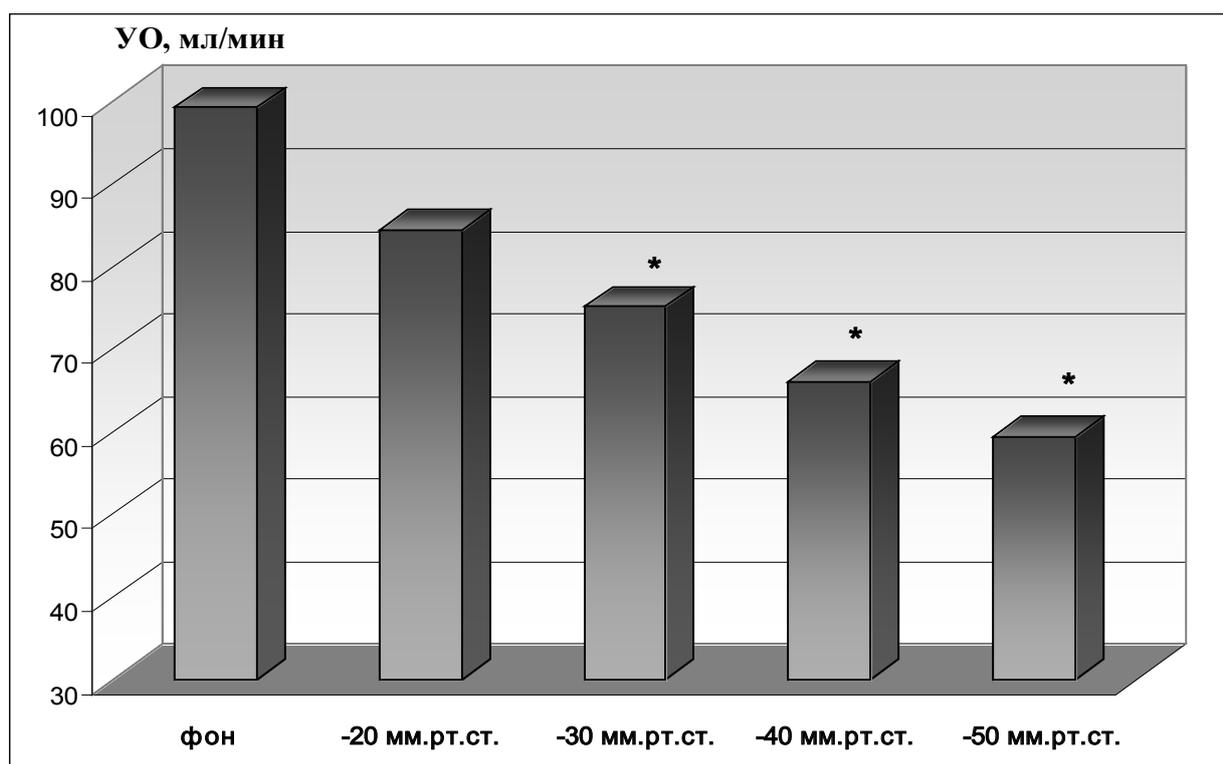


Рис. 4. Динамика ударного объема при воздействии ОДНТ  
\* — достоверные отличия ( $P < 0.05$ ) от фоновых значений

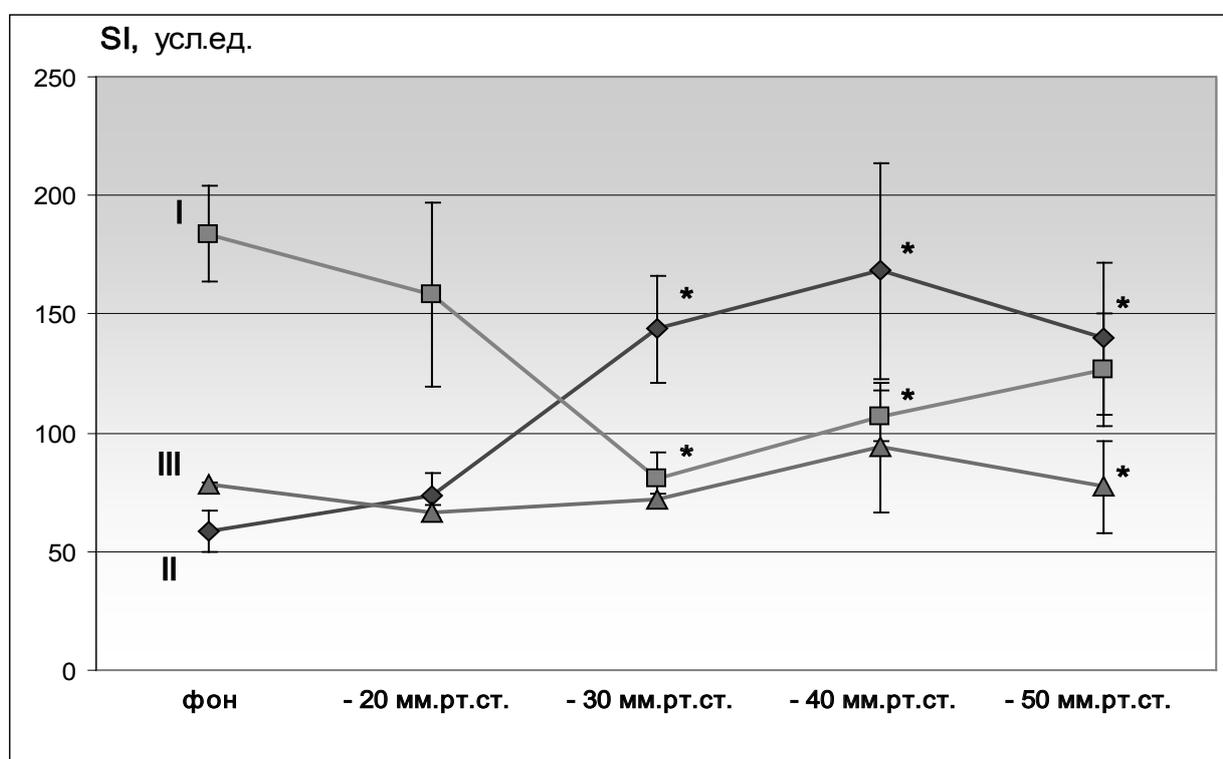


Рис. 5. Динамика SI в трех группах испытуемых при воздействии ОДНТ.  
\* — достоверные отличия ( $P < 0.05$ ) от фоновых значений

Ответные реакции на ступенчатое возрастание отрицательного давления проявлялись в скорости и направленности адаптационных реакций. Кроме того, в каждой группе исходный уровень SI отличался от других. Для первой группы характерны изначально высокие показатели стресс-индекса ( $183,9 \pm 20$  у.е.). В этой группе наиболее выраженная реакция на воздействие ОДНТ наблюдалась при разрежении  $-30$  мм рт.ст. и выразалось в резком снижении SI до  $80,3 \pm 11,4$  у.е. В дальнейшем происходило незначительное увеличение этого показателя. Такая динамика наблюдалась у 6 человек, участвующих в эксперименте.

Во вторую, самую многочисленную группу ( $N=14$ ), вошли лица с изначально низкими показателями индекса напряжения регуляторных систем ( $58,6 \pm 8,9$  у.е.). При начале воздействия для них было характерно увеличение этого показателя с достижением максимума до  $168,4 \pm 45$ . Высокие показатели вариационного размаха указывают на индивидуальный характер адаптационных реакций каждого испытуемого.

Третья группа ( $n=5$ ) характеризовалась стабильностью и наименьшей изменчивостью показателей вегетативного баланса на всех этапах воздействия. Значения SI на этапе фоновых данных составляло  $78,12 \pm 1$ , а наибольшая величина не превышала  $94$  у.е. на этапе разрежения в  $-40$  мм. рт. ст.

Таким образом, проведенное исследование, позволило нам сформулировать следующие выводы:

1. Процессы адаптации регуляторных механизмов, принимавших участие в исследовании добровольцев, были направлены на мобилизацию функциональных резервов. Реализация этих механизмов была связана с активацией симпатического отдела автономной нервной системы.
2. Высшие вегетативные центры, регулирующие стабильность механизмов адаптации системы кровообращения включались в процесс регуляции на этапе значительного разрежения при ОДНТ, что свидетельствует о дополнительной мобилизации функциональных резервов.
3. Реакция центрального и регионарного кровообращения была характерной для депонирования части циркулирующей крови в зоне декомпрессии, о чем свидетельствовало постепенное снижение в процессе ОДНТ ударного объема крови и сократительной функции сердца.
4. В процессе увеличения степени воздействия происходил рост сосудистого тонуса. Как показано выше, этим моментам соответствовало снижение ударного объема и перестройка регуляторных механизмов.
5. Реакции системы вегетативной регуляции кровообращения при воздействии ОДНТ характеризовались высокой степенью индивидуальности. Об этом свидетельствует значительная лабильность и выраженность адаптационных реакций механизмов регуляции сердечно-сосудистого гомеостаза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баевский Р. М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии — М.: Медицина, 1979. — 298 с.
2. Баевский Р. М. Современные проблемы космической кардиологии // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2008, № 6, с. 19–31
3. Котовская А. Р. Фомина, Г. А. Сердечно-сосудистая система человека // В кн.: *Космическая медицина и биология*. — В: Научная книга, 2013. — С. 306–320
4. Методы и приборы космической кардиологии на борту Международной космической станции (под ред. д.м.н., проф. Р. М. Баевского, академика РАН О. И. Орлова), Москва, Изд-во Техносфера, 2016 г., 367 стр.
5. Турчанинова В. Ф., Алферова И. В., Голубчикова З. А. и др. Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы в состоянии покоя. Орбитальная станция «Мир». Т № 1. М.: 2001. С. 267–276.
6. Фомина Г. А., Котовская А. Р., Поляков В. В. и др. Влияние невесомости на центральную и периферическую гемодинамику человека по данным ультразвуковых методов исследования. Орбитальная станция «Мир». 2002. Т2. С. 529–541.
7. Фомина Г. А., Котовская А. Р., Почув В. И. и др. Изменения гемодинамических механизмов, обеспечивающих ортостатическую устойчивость человека в длительных космических полетах // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2005. Т. 39. № 6. С. 9–16.
8. A.I. Grigoriev, A. R. Kotovskaya, G. A. Fomina. The human cardiovascular system during space flight. *Acta Astronautica* 68 (2011), p. 1495–1500
9. Козловская, И. Б., Ярманова, Е. Н. Фомина, Е. В. Российская система профилактики: настоящее и будущее // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. — 2013. — Т. 47. — № 1. — С. 13–20
10. Козловская, И. Б., Ярманова, Е. Н., Егоров, А. Д. Степанцов, В. И., Фомина, Е. В., Томиловская, Е. С., Шпаков, А. В., Хуснудинова Д. Р., Шипов А. А. Развитие российской системы профилактики неблагоприятных влияний невесомости в длинных полетах на МКС // В кн: *Космическая биология и медицина. Медицинское обеспечение экипажей МКС*. — М: Научная книга, 2011. — Т 1. — С. 63–98.

© Русанов Василий Борисович (vasilyrusanov@gmail.com), Лучицкая Елена Сергеевна (e.luchitskaya@gmail.com),

Баевский Роман Маркович, Тавокалиан Кайяр.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»