

УДК 613.614:613.693

# Изучение влияния длительной невесомости на вегетативную регуляцию кровообращения у членов экипажей международной космической станции. Космический эксперимент «Пневмокард»

Р. М. Баевский, И. И. Фунтова, Е. С. Лучицкая, А. Г. Черникова  
Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

## Резюме

В статье представлены результаты космического эксперимента «Пневмокард», который ежемесячно проводился на борту Международной космической станции (МКС) с марта 2007 г. по декабрь 2012 г. Всего в исследованиях приняли участие 25 космонавтов, проведено 226 исследований. Эксперимент «Пневмокард» посвящен изучению влияния факторов космического полета на вегетативную регуляцию кровообращения, дыхание и сократительную функцию сердца в длительном космическом полете. Исследования на борту МКС проводились с помощью специализированного аппаратно-программного комплекса «Пневмокард».

При анализе данных значительное место занимал анализ variability сердечного ритма (ВСР), направленный на оценку особенностей вегетативной регуляции кровообращения. Имеются выраженные индивидуальные особенности перенастройки вегетативного гомеостаза в процессе полета, что обусловлено разными индивидуальными типами вегетативной регуляции.

Наибольший интерес для практики медицинского обеспечения космических полетов представляют результаты применения донозологического подхода и методов вероятностной оценки риска развития патологии.

**Ключевые слова:** кардиореспираторная система, вегетативная регуляция, механизмы адаптации, variability сердечного ритма, функциональные резервы, степень напряжения, вероятностная оценка, категория риска.

**Клин. информат. и Телемед.**  
2013. Т.9. Вып.10. с.79–89

## Введение

Многomesячное пребывание человека в космосе связано с перестройкой всех систем организма на новый уровень функционирования, соответствующий необычным (отличающимся от земных) условиям жизни на борту орбитальной станции. Одной из главных мишеней воздействия невесомости является сердечно-сосудистая система. Это обусловлено, прежде всего, смещением жидких сред в верхнюю часть тела и увеличением относительного объема крови в малом круге кровообращения и в сосудах головного мозга. Одновременное уменьшение энерготрат организма и снижение потока афферентной импульсации создают для механизмов регуляции кровообращения трудную задачу обеспечения достаточного кровоснабжения органов и тканей в новых условиях. Адаптационные реакции организма в космическом полете в значительной мере определяются состоянием сердечно-сосудистой системы и регулирующих ее механизмов. Проводившиеся в ИМБП исследования регуляции сердечного ритма в условиях длительных космических полетов на орбитальных станциях «Салют» и «Мир» показали, что в условиях космического полета происходит перенастройка системы вегетативной регуляции кровообращения. При этом наблюдаются характерные

изменения вегетативного баланса и активности различных звеньев сегментарного и надсегментарного уровней управления, которые обеспечивают процесс адаптации организма к условиям длительной невесомости [1, 2]. Новый шаг в изучении вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости был сделан в последние годы в результате проведения на борту Международной космической станции (МКС) научных экспериментов «Пульс» и «Пневмокард» [3]. В эксперименте «Пульс» (5–13-я экспедиции на МКС) основное внимание было обращено на изучение вегетативной регуляции кровообращения и дыхания в условиях длительной невесомости. В нем регистрировались только электрокардиограмма, пневмотахограмма и периферический пульс с помощью пальцевого фотоплетизмографического датчика [4, 5]. Начиная с 14-й экспедиции, на МКС в течение пяти лет (с марта 2007 г. до конца 2012 г.) ежемесячно у всех российских членов экипажей МКС проводился эксперимент «Пневмокард» [6]. В этом эксперименте дополнительно регистрировались сейсмокардиограмма и импедансная кардиограмма. Совместная синхронная регистрация пяти параметров и проведение серии функциональных проб позволили наряду с вегетативной регуляцией кровообращения оценивать сократительную функцию сердца и центральную гемодинамику, а также непосредственно судить об адаптационных возможностях организма на разных

этапах длительного космического полета. Таким образом, «Пневмокард» оказался первым научным экспериментом в космосе, где удалось в комплексе получить обширную информацию о различных параметрах сердечной деятельности и использовать эти данные для оценки функционального состояния организма членов экипажей и для определения риска развития патологии.

Целью эксперимента «Пневмокард» являлось получение новой научной информации для углубления представлений о механизмах адаптации кардиореспираторной системы к условиям длительного космического полета.

## Методика исследований

В ходе эксперимента регистрировались следующие физиологические сигналы:

- электрокардиограмма (ЭКГ);
- импедансная кардиограмма (ИКГ) по классическому методу Шрамека с использованием восьми одноразовых электродов. При этом четыре электрода располагаются на шее (по два справа и слева) и четыре электрода — на грудной клетке (по два справа и слева);
- сейсмокардиограмма (СКГ);
- пневмотахограмма (ПТГ);
- фотоплетизмограмма пальца (ФПГ).

Исследования на борту МКС проводились с помощью специализированного аппаратно-программного комплекса «Пневмокард», на который оформлен патент «Компактное мобильное устройство для исследования кардиореспираторной системы космонавтов на борту космических объектов» (патент РФ №77783 от 03 июля 2008 г.). Комплекс «Пневмокард» с электродами и датчиками размещался на нагрудном поясе космонавта и обеспечивал комфортность проведения экспериментальных исследований в условиях невесомости. Регистрируемая информация записывалась в память бортового компьютера и передавалась на Землю по каналам Интернета, а так же доставлялась в виде магнитных записей при возвращении экипажей на Землю.

Подготовка космонавта перед проведением обследования заключалась в одевании специализированного пояса таким образом, чтобы датчик СКГ, преобразующий линейное ускорение в напряжение, оказался в области проекции сердца. На специализированном поясе

также закреплялся прибор «Пневмокард». Датчик для регистрации фотоплетизмограммы и преобразователь оптической плотности исследуемой ткани в напряжение, закреплялся на среднем пальце левой руки. Датчик пневмотахограммы устанавливается около наружных носовых ходов и представлял собой терморезистор, преобразующий температуру окружающего воздуха в сопротивление. На рис. 1 представлено фото одного из членов экипажей при подготовке к выполнению эксперимента «Пневмокард» на борту МКС.

Программа исследований включала запись сигналов в покое (5 минут), выполнение функциональных нагрузочных тестов с фиксированным темпом дыхания (10 дыханий в минуту — в течение 3-х минут; 6 дыханий в минуту — в течение 3-х минут) и с максимальной задержкой дыхания на вдохе и выдохе. До и после полета дополнительно проводилась активная ортостатическая проба.

Образец записи приводится на рис. 2. Внизу представлена кардиоинтервалограмма, регистрируемая при анализе вариабельности сердечного ритма (ВСР) на всех этапах эксперимента. При анализе результатов исследований определялось большее число различных показателей, среди которых ведущую роль играли показатели ВСР, что позволило изучать состояние вегетативной регуляции функций. Этот метод широко использу-

ется в космической медицине, начиная с первых пилотируемых полетов [7].

Анализ ВСР является интегральным методом оценки состояния механизмов регуляции физиологических функций в организме человека и животных, в частности общей активности регуляторных механизмов, нейрогуморальной регуляции сердца, соотношения между симпатическим и парасимпатическим отделами вегетативной нервной системы. Текущая активность симпатического и парасимпатического отделов является результатом многоконтурной и многоуровневой реакции системы регуляции кровообращения, изменяющей во времени свои параметры для достижения оптимального приспособительного ответа, который отражает адаптационную реакцию целостного организма [8, 9, 10]. Метод основан на распознавании и измерении временных интервалов между R-зубцами ЭКГ (R-R-интервалы), построении динамических рядов кардиоинтервалов (кардиоинтервалограммы) и последующего анализа полученных числовых рядов различными математическими методами.

При анализе и оценке получаемой в космическом эксперименте информации использовались новые современные подходы. В космической медицине был разработан принципиально новый подход к оценке здоровья, основанный на современных представлениях теории

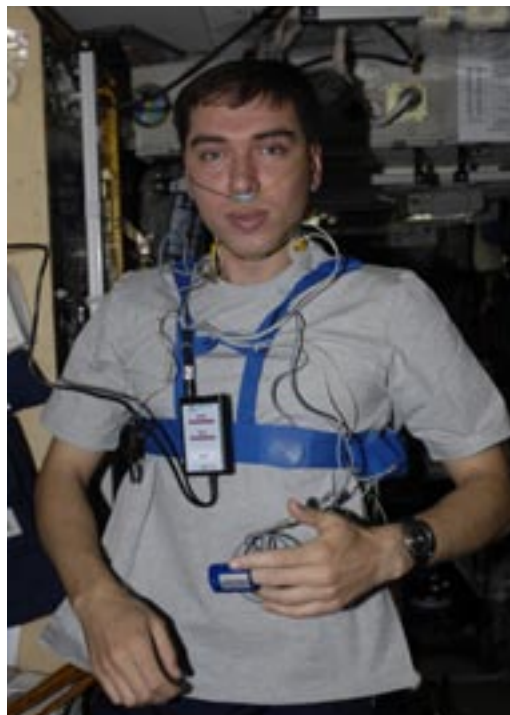
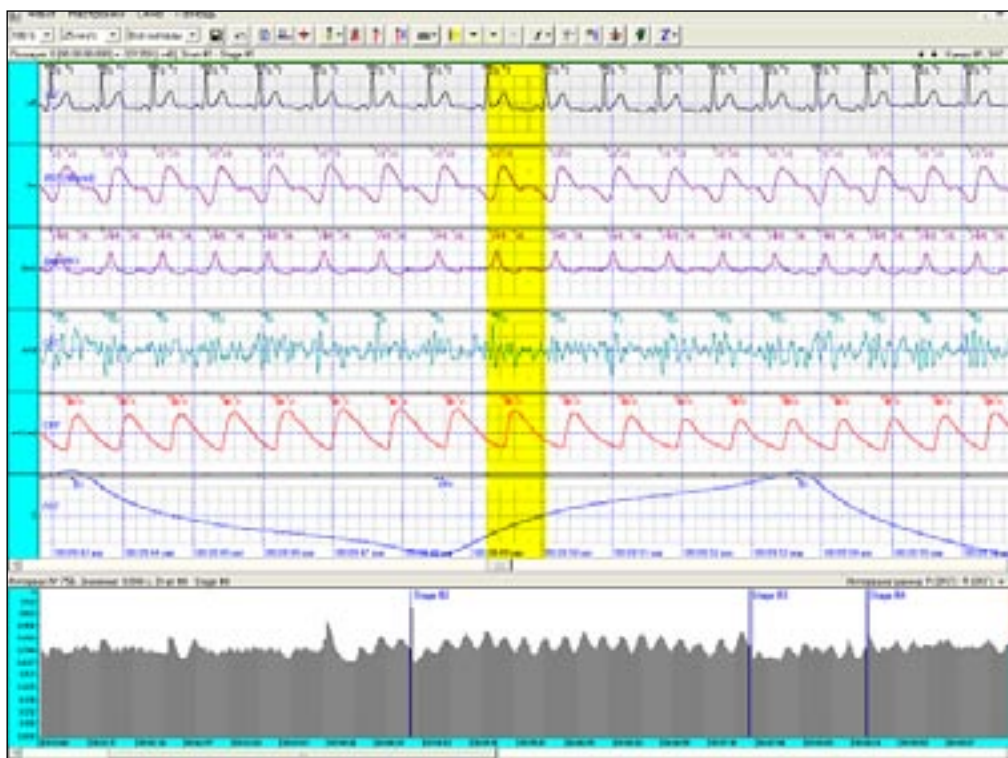


Рис. 1. Подготовка к выполнению эксперимента «Пневмокард» на борту МКС.



**Рис. 2.** Образец записи физиологических сигналов с помощью комплекса «Пневмокард». Сверху вниз: электрокардиограмма, импедансная кардиограмма, первая производная импедансной кардиограммы, сейсмокардиограмма, фотоплетизмограмма пальца, пневмотахограмма. Внизу — кардиоинтервалограмма на этапах покоя, фиксированного темпа дыхания и задержек дыхания на вдохе и выдохе.

адаптации и учения о гомеостазе [11]. Сущность этого подхода состоит в том, что здоровье рассматривается как процесс непрерывного приспособления организма к условиям окружающей среды, а мерой здоровья являются адаптационные (приспособительные) возможности организма. Переход от здоровья к болезни связан со снижением адаптационных возможностей организма, с уменьшением способности адекватно реагировать не только на социально-трудовые, но и на обычные повседневные нагрузки. При этом на границе между здоровьем и болезнью возникает целый ряд переходных состояний, получивших название донозологических [12, 13]. Результаты проведенных исследований рассматриваются с позиций донозологической диагностики, изучающей состояние организма, пограничные между нормой и патологией. Ведущим методом донозологической диагностики является анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР). На его основе была создана математическая модель функциональных состояний организма. При этом пространство состояний определяется двумя основными показателями: СН (степень напряжения регуляторных систем) и ФР

(функциональные резервы). На основе математической модели был разработан вероятностный подход к оценке риска развития патологии [14].

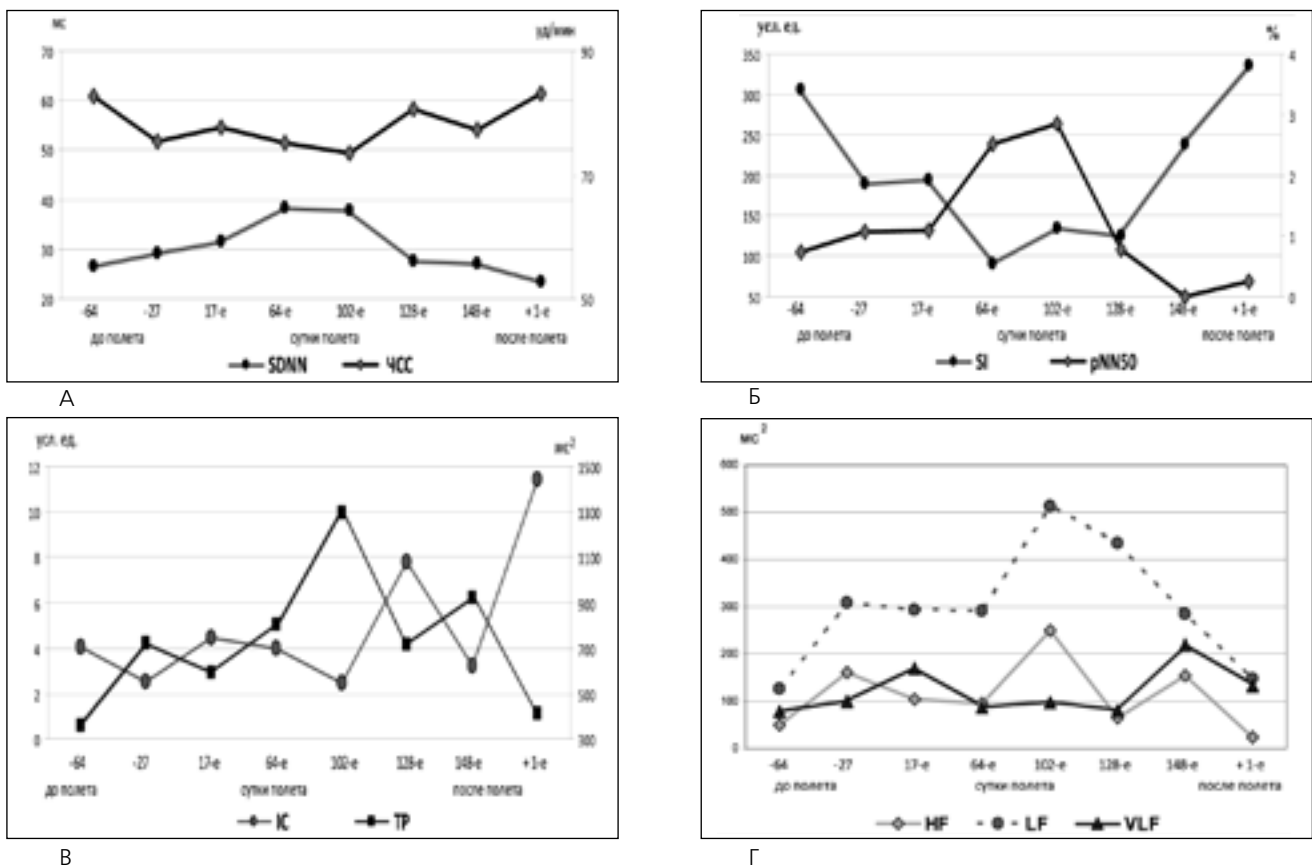
## Результаты исследований

### А. Процессы адаптации сердечно-сосудистой системы к условиям невесомости. Роль вегетативной регуляции

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

(ВСР). На рис. 3 (А, Б, В, Г) на примере данных одного из членов экипажа МКС представлены характерные изменения вегетативной регуляции на разных этапах длительного космического полета. Как видно из этих данных, частота сердечных сокращений (ЧСС) в полете была на 5–10 уд/мин ниже, чем в предполетном периоде, а в первые сутки после полета была равна предполетному значению. Изменения ВСР (SDNN) в первой половине полета демонстрируют тенденцию к значительному росту (с 26 мс до 39 мс) с последующим снижением к концу полета до исходных значений. Однако более детальный анализ вегетативного баланса в полете показывает, что его динамика была достаточно сложной.

В предполетном периоде у космонавта отмечался высокий тонус симпатической нервной системы. Значения стресс индекса (SI) были равны 189–306 усл. ед., а на 17-е сутки полета сохранялось значение SI равное 184 усл. ед. Затем в ходе полета, как это видно из рис. 3Б, наблюдалось снижение SI с отчетливым ростом показателя рNN50. Так на 102 сутки полета величина SI снизилась до 135 усл. ед., но это



**Рис. 3.** Изменения показателей ВСП у одного из членов экипажа МКС на разных этапах космического полета. А — ЧСС и СКО (SDNN); Б — СИ (стресс индекс) и рNN50; В — ТР (суммарная мощность спектра — Total Power) и IC (Индекс централизации); Г — активность отдельных звеньев регуляторного механизма (HF — активность парасимпатического звена регуляции; LF — активность симпатических центров регуляции сосудистого тонуса; VLF — активность сегментарных и надсегментарных центров регуляции энергометаболических процессов).

снижение потребовало значительной мобилизации функциональных резервов регуляторного механизма.

На рис. 3В представлены графики показателей ТР (суммарная мощность ВСП) и IC (индекс централизации регуляторных механизмов), из которых видно, что суммарная мощность спектра ВСП на 102-е сутки полета выросла в 3 раза по сравнению с предполетным уровнем. В это же время наблюдалось почти двукратное снижение индекса централизации (IC).

В этом исследовании наблюдался также максимум абсолютного значения мощности низкочастотных колебаний ВСП (LF), которые связаны с регуляцией артериального давления (рис. 3Г).

На 128-е сутки полета повышенная активность подкоркового сосудистого центра сохранялась, о чем свидетельствует не только сохранение высокого абсолютного значения показателя LF, но и его максимальная относительная величина (рис. 3Г), достигающая 75%. Индекс централизации при этом до-

стигает величины в 7,8 относительных единиц, что обусловлено высоким значением LF.

При рассмотрении изменений регуляции сосудистого тонуса, которые наблюдались у этого космонавта на 102-е и 128-е сутки полета, следует отметить, что они происходили при относительно нормальных значениях ЧСС и СИ. В связи с этим важно обратить внимание на представленную на рис. 4 динамику ультранизкочастотных колебаний ВСП (ULF). Величина этого показателя на 102-е сутки полета была максимальной (435 мВт по сравнению со 102 мВт до полета) и это указывает на высокую активность надсегментарных отделов мозга. Таким образом, можно говорить о связи наблюдавшихся изменений сосудистой регуляции с активацией гипоталамо-гипофизарного отдела, т. е. о включении в процессы управления высших вегетативных центров. Подобные явления могут быть связаны с утомлением, плохим сном или психо-эмоциональным напряжением.

В конце полета на 148-е сутки снова растет стресс-индекс (до 238 усл. ед.) и резко снижается значение показателя рNN50 (рис. 3Б), увеличивается мощность очень низкочастотных колебаний ВСП (VLF), достигая величины в 219 мВт, по сравнению с 78 мВт до полета. Таким образом, значительно увеличивается активность симпатического звена регуляции, направленная на мобилизацию функциональных резервов. Резкое снижение функциональных резервов в конце полета проявляется выраженной стрессорной реакцией в послеполетном периоде. Как видно из рис. 3 (Б-В), после полета стресс индекс возрастает до 335 усл. ед., индекс централизации увеличивается до значения в 11,4.

Описанная выше характерная динамика показателей вегетативной регуляции существенно зависит от индивидуальных особенностей регуляторного механизма. В табл. 1 представлены данные об индивидуальных особенностях вегетативной регуляции на разных этапах космического полета у членов

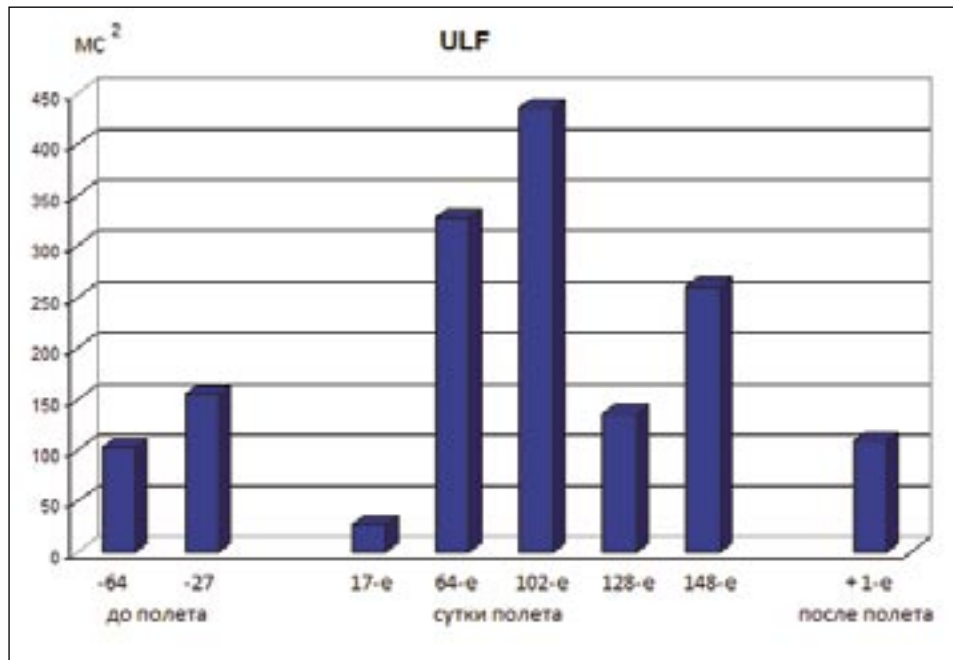


Рис. 4. Динамика показателя ULF (ультранизкочастотные колебания ВСР) у одного из членов экипажа МКС.

Российских экипажей МКС. Как следует из данных этой таблицы, прямая связь между результатами предполетных исследований и результатами исследований в полете и после полета отсутствует. Однако имеется сходство в реакциях космонавтов с крайними типами вегетативной регуляции. Например, у К-10 и у К-13 с наибольшими предполетными значениями ЧП и Ин в послеполетном периоде отмечали высокие значения ЧП (112 и 85), а у К-10 самое высокое значение Ин (915). В то же время у К-6 с самым низким предполетным значением ЧП (52) после полета величина ЧП также была очень высокой (84).

Величина показателя ТР, характеризующего запас функциональных резервов регуляторного механизма, также не является прогностически значимой. Так, у К-16 с самыми высокими значениями этого показателя в полете (2200–6000) до полета также наблюдался относительно высокое значение ТР (3480), но в то же время у К-14 с самым большим предполетным показателем ТР (8000) в полете и после полета никаких значимых особенностей вегетативной регуляции не выявлено. Эти наблюдения явились стимулом к разработке новых методов оценки функционального состояния, учитывающих тип вегетативной регуляции.

На рис. 5 показаны графики среднеполетных значений частоты пульса (ЧП), индекса напряжения регуляторных систем (Ин) и суммарной мощности

спектра ВСР (ТР). Как видно, тенденции изменений частоты пульса к урежению во время полета сопровождаются снижением индекса напряжения регуляторных систем и значительным увеличением суммарной мощности спектра ВСР. Это обусловлено постепенным компенсаторным увеличением активности систем вегетативной регуляции. Эти данные указывают на общие тенденции изменений вегетативного гомеостаза, которым не всегда соответствуют результаты индивидуальных исследований. По-видимому, это обусловлено разными индивидуальными типами вегетативной регуляции, что является причиной различий в адапционных реакциях членов экипажей.

## Б. Оценка риска развития патологии

При оценке риска развития патологии на разных этапах космического полета была использована математическая модель функциональных состояний организма, разработанная на основе обобщения результатов анализа вариабельности сердечного ритма у всех Российских космонавтов, совершивших длительные полеты на МКС [15].

Модель представляет собой систему из двух уравнений дискриминантной функции, первое из которых отражает степень напряжения регуляторных си-

стем (СН), второе – их функциональный резерв (ФР). Параметры СН и ФР вычисляются по показателям ЧСС, рNN50, SI, HF, %. При этом учитывается и индивидуальный тип вегетативной регуляции. По значениям СН и ФР строится фазовая плоскость, которая представляет собой двумерное пространство функциональных состояний. В нем каждый из четырех квадрантов соответствует одному из четырех функциональных состояний (физиологическая норма, донозологическое состояние, преморбидное состояние, патологическое состояние).

Текущее функциональное состояние при каждом исследовании определяется как точка с координатами СН и ФР, а изменения функционального состояния в ходе космического полета отображаются траекторией на фазовой плоскости. На рис. 6 представлены траектории функционального состояния в ходе длительного космического полета у четырех членов экипажей МКС с разными типами вегетативной регуляции.

На рис. 7 представлена траектория функциональных состояний в полете одного из членов экипажа МКС (К-17). Как видно, функциональное состояние космонавта на всех этапах полета находится в зоне донозологических состояний. В конце полета (на 148-е сутки) выраженность донозологического состояния увеличивается, достигая предполетного уровня, а после полета находится на границе с зоной преморбидных состояний.

**Табл. 1. Индивидуальные особенности вегетативной регуляции на разных этапах космического полета у членов Российских экипажей МКС по данным космического эксперимента «Пневмокард».**

Члены экипажей МКС №№	Значения показателей variability сердечного ритма								
	До полета			В полете			После полета		
	ЧП	Ин	ТР	ЧП	Ин	ТР	ЧП	Ин	ТР
1	71	177	2735	63-68	70-180	4800	76	544	2864
2	63	65	2270	58-82	44-103	1500-3100	97	680	430
3	67	165	835	48-57	34-108	1000-2500	67	86	690
4	66	98	1130	65	212	480	105	590	380
5	63	77	1550	64-77	30-130	1130-3100	80	258	470
6	52	23	3860	55-59	27-68	2000-6500	84	177	1200
7	70	101	1670	48-55	22-62	1750-3600	63	48	4370
8	59	64	2100	66-75	108-183	750-1450	71	156	920
9	56	66	2030	46-71	21-61	1960-5350	73	52	3070
10	85	400	360	68-78	100-270	500-1700	112	915	1900
11	58	100	1200	51-57	40-165	790-4000	57	68	1150
12	68	105	1300	64-71	45-89	2200-3100	82	84	2140
13	89	270	1000	66-80	48-70	2200-3100	85	100	1300
14	65	25	8000	62-70	25-154	1000-5000	57	50	2750
15	55	130	450	55-61	75-102	800-3600	61	142	1000
16	60	26	3480	45-60	22-50	2200-6000	83	280	530
17	75	190	720	73-80	90-240	600-1300	83	340	410
18	70	88	1700	53-65	30-53	970-5100	64	65	2050
19	68	90	2140	62-74	57-110	800-2100	81	360	420
20	67	124	1600	53-68	45-90	1650-4500	69	136	860
21	72	65	1980	62-69	70-140	620-2700	83	112	1870
22	71	47	1800	58-62	30-70	1800-3500	61	30	8000
23	58	114	1200	64-71	71-200	600-2500	78	181	1196
24	57	98	1500	45-52	40-63	985-2500	67	116	3555
25	67	77	1800	59-70	117-240	340-1160	69	280	760

На основе параметров СН и ФР с учетом индивидуального типа вегетативной регуляции рассчитываются вероятности функциональных состояний при каждом из исследований. Поскольку каждая точка в пространстве состояний имеет продолжение в будущем, можно вычислить это будущее, используя аппарат теории вероятностей. Оценка текущего функционального состояния дается по его наибольшей вероятности, но вместе с тем можно судить и о вероят-

ности развития других функциональных состояний, в том числе патологии.

На рис. 8 представлены вероятностные оценки функциональных состояний у К-17 на каждом из этапов длительного космического полета.

Вероятностный подход показывает, что еще до полета, а также и после полета донозологическое состояние было значительно более выраженным, чем состояние нормы. В полете только на 64-е и 128-е сутки состояние физио-

логической нормы имело более высокую вероятность, чем донозологическое состояние.

Для оценки риска развития патологии в ГНЦ РФ-ИМБП РАН была разработана система определения категории риска [14]. Создана шкала оценок, включающая 10 категорий риска. При этом 1-3 категории риска относятся к относительно безопасной зоне функциональных состояний, а 4-5 категории уже указывают на наличие неблагоприятных



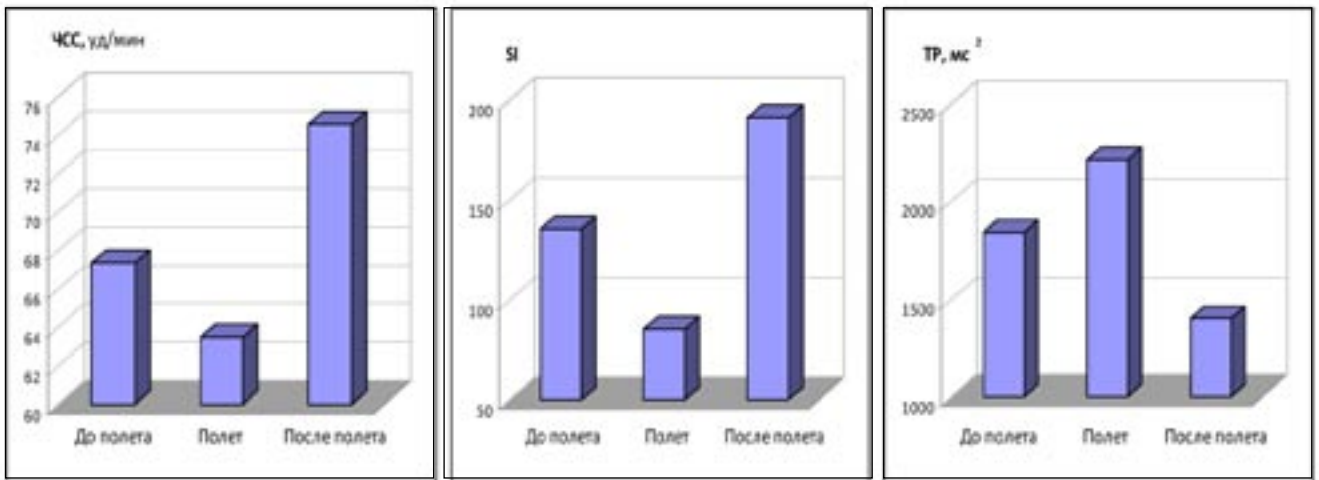


Рис. 5. Среднеполетные значения частоты пульса, индекса напряжения регуляторных систем и суммарной мощности спектра ВСР у членов Российских экипажей МКС (n=25).

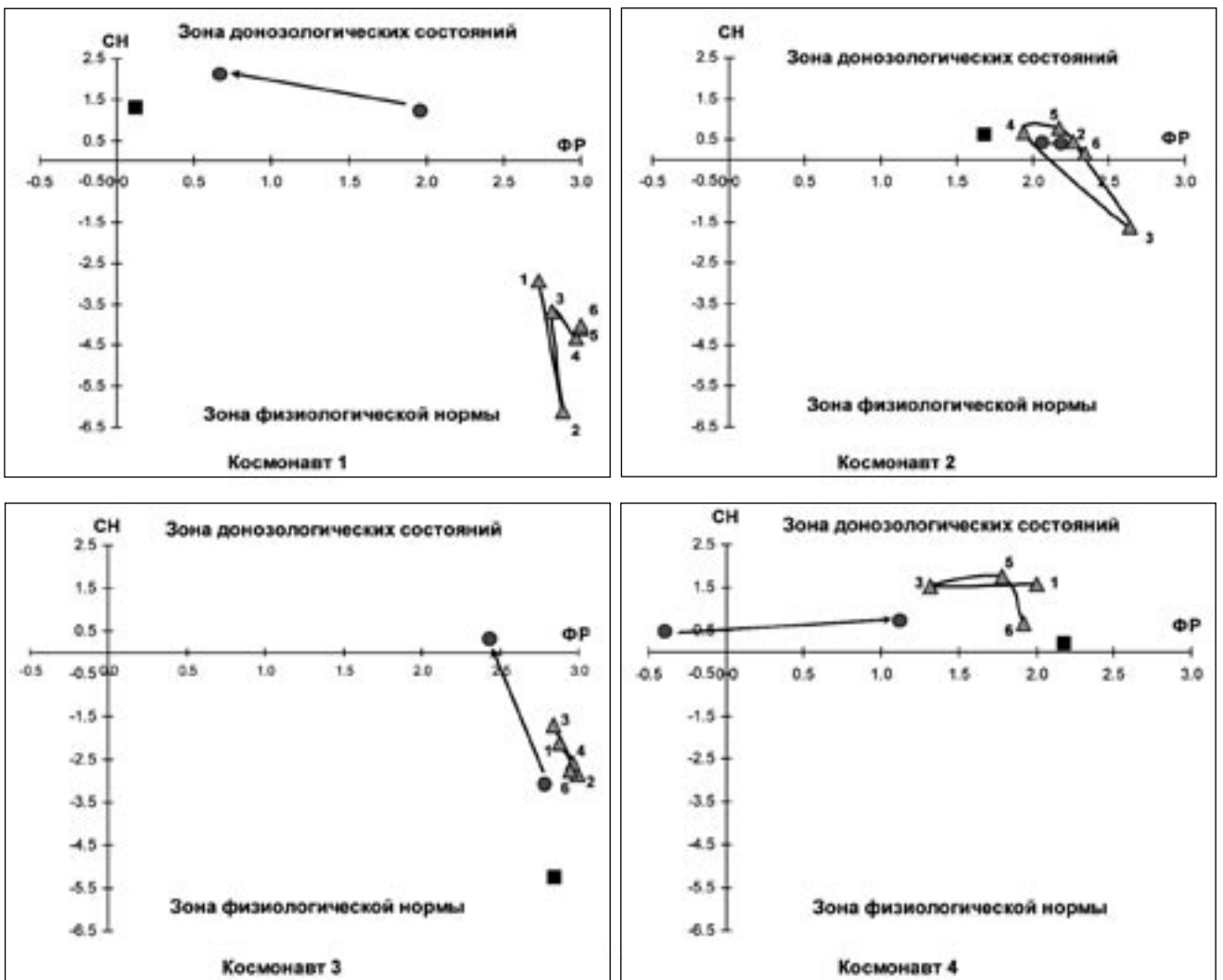


Рис. 6. Траектории функционального состояния в ходе длительного космического полета у четырех членов экипажей МКС с разными типами вегетативной регуляции.

для здоровья условий, 6–7 категории риска требуют срочного принятия мер по оптимизации условий жизни и труда, а риски 8-й категории и выше указывают на необходимость немедленных мероприятий по снижению риска. На рис. 9 представлены категории риска, вычисленные для К-17 на разных этапах длительного космического полета. Согласно этим данным в предполетном и послеполетном периоде, а также на 148-е сутки полета функциональное состояние К-17 было неблагоприятным.

В табл. 2 представлены результаты оценки функционального состояния всех Российских членов экипажей МКС, выполнявших эксперимент «Пневмокард». Из этих данных видно, что до полета из 25 космонавтов донозологическое состояние наблюдалось в 9 случаях и одном случае состояние оценивалось как преморбидное. Во время полета в 16 случаях наблюдались эпизоды донозологического состояния. После полета донозологическое состояние было отмечено в 13 случаях и в 5 случаях оно было квалифицировано как преморбидное. Из этого может быть сделан вывод, о том, что стрессорное воздействие комплекса факторов космического полета на организм человека является довольно значительным, так как в полете донозологические состояния наблюдались в 1,5 раза чаще, чем до полета, а после полета у 20% космонавтов были отмечены преморбидные состояния. Средние категории риска соответственно были равны в предполетном периоде – 2,08; во время полета – 3,04; после полета – 3,36.

Представленные материалы показывают, что использование вероятностного подхода к анализу ВСР и предлагаемые методы оценки риска развития патологии могут быть с пользой применены в практике медицинского обеспечения космических полетов.

## Заключение

Космический эксперимент «Пневмокард» явился новым этапом развития космической медицины и, в частности, космической кардиологии. Прежде всего, это не разовый эксперимент, а большая серия систематических целенаправленных исследований кардиореспираторной системы, ежемесячно проводимых на борту МКС в течение более пяти лет. Следует отметить приоритетный характер полученных экспериментальных материалов. Эти дан-

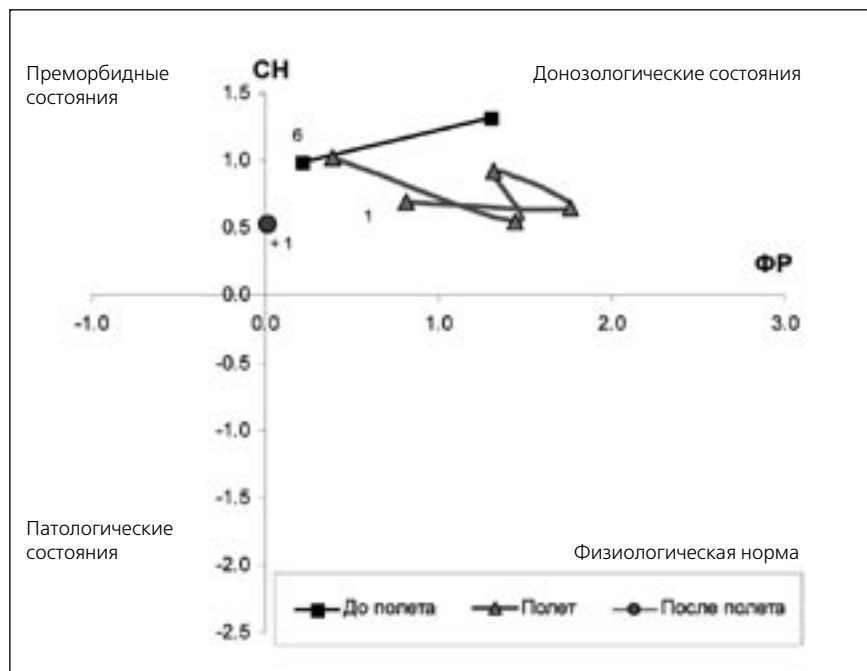


Рис. 7. Динамика изменений функционального состояния одного из космонавтов (К-17) в ходе космического полета (траектория на фазовой плоскости). По оси абсцисс — значения ФР (функциональный резерв), по оси ординат — значения СН (степень напряжения).

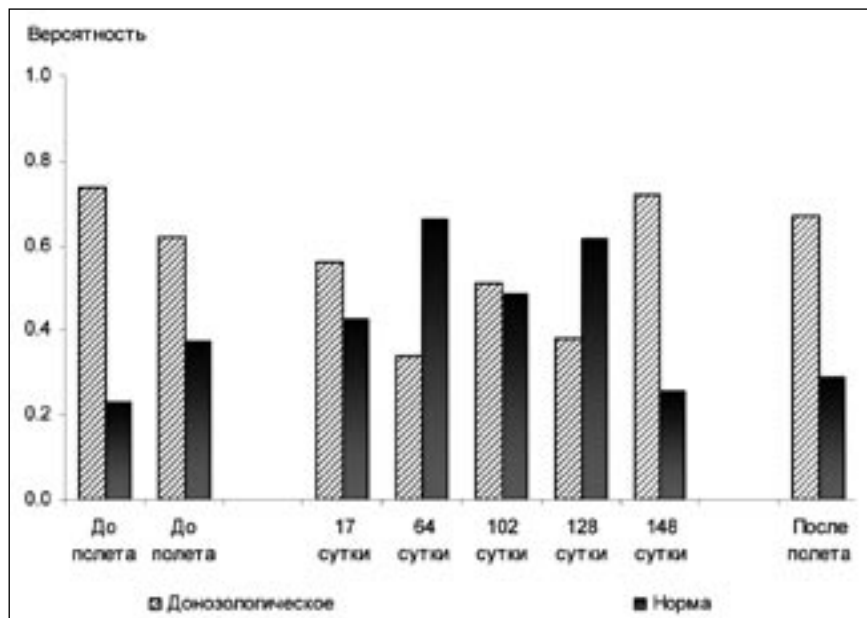


Рис. 8. Вероятности состояний физиологической нормы и донозологического состояния у К-17 на разных этапах длительного космического полета.

ные получили положительную оценку на многих Российских и международных симпозиумах и конференциях [2, 3, 4, 5, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Их теоретическое значение определяется тем, что впервые экспериментально обоснована

важная роль вегетативной регуляции в обеспечении сердечнососудистого гомеостаза в условиях длительного космического полета. Выявлены механизмы перенастройки вегетативного баланса на разных этапах длительного



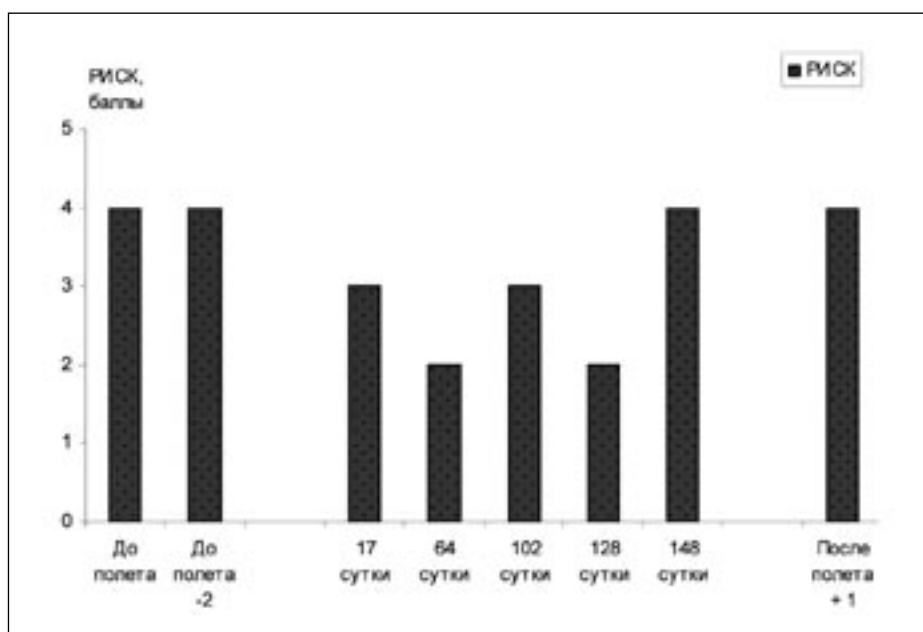


Рис. 9. Категории риска у К-17 на разных этапах длительного космического полета.

Табл. 2. Оценка функционального состояния членов Российских экипажей МКС по данным космического эксперимента «Пневмокард».

Члены экипажей МКС №№	До полета	В полете	После полета	Категории риска
1	Д	Н	Н	4-3-3
2	Н	Н-Д-Н	Д	1-4-6
3	Н	Н	Н-П	3-3-7
4	Н	Н-Д	П	1-6-9
5	Н	Д-Н	Д	1-4-3
6	Н	Д-Н	Д-Н	1-5-3
7	Н	Н	Н	3-2-1
8	Н	Н	Н-Д	2-3-3
9	Н	Н	Н	2-1-1
10	Д	Д	П	4-4-8
11	Д	Д	Д	2-4-2
12	Д	Н-Д	Д	3-3-4
13	П	Д	Д	5-2-2
14	Н	Н-Д-Н	Н	1-4-1
15	Д	Д	Д	2-3-2
16	Н	Н	Д-Н	1-2-4
17	Д	Д	Д	4-4-4
18	Д	Д-Н	Н	1-2-1
19	Н-Д	Н-Д	П-Д	2-2-4
20	Д	Д	Д	2-3-2
21	Н	Д-Н-Д	Д-П	1-2-4
22	Н	Н	Д-Н	1-1-3
23	Н	Н-Д	Н	3-4-2
24	Н	Н	Н	1-2-2
25	Н	Н-Д	Д-Н	1-3-3

воздействия невесомости и определены критерии их оценки по показателям ВСР. Наконец, показано, что адаптация организма космонавта к условиям невесомости в значительной мере зависит от индивидуального типа вегетативной регуляции.

Прикладное значение результатов проведенных исследований определяется двумя положениями: 1) разработана и практически апробирована методика определения индивидуального типа вегетативной регуляции у членов космического экипажа; 2) разработан вероятностный подход к оценке риска развития патологии в условиях длительного космического полета, который позволяет прогнозировать ухудшение функционального состояния членов экипажа. Оба эти положения представляют интерес не только для космической медицины, но и для различных областей прикладной физиологии, которые изучают адаптационные реакции организма человека при воздействии экстремальных факторов окружающей среды. Космическая медицина активно содействует внедрению в практику новых космических технологий, используя одновременно все новейшие достижения медицинской науки для обеспечения здоровья и нормальной жизнедеятельности космических экипажей.

## Литература

1. Баевский Р. М., Никулина Г. А., Фунтова И. И., Черникова А. Г. Вегетативная регуляция кровообращения. В кн. Орбитальная станция «Мир», т. 2, 2001, С. 36–68.
2. Баевский Р. М., Фунтова И. И., Гариб Г. Роль симпатического звена регуляции в поддержании сердечно-сосудистого гомеостаза в условиях длительной невесомости. Материалы 12-й конференции по космической биологии и авиакосмической медицине. М., 2002, с. 39–41.
3. Baevsky R. M., Funtova I. I., Diedrich A., Chernikova A. G., Tank J. Autonomic function testing aboard the ISS using «PNEUMOCARD». 58-th Congress IAA, Haydarabad, India, September, 2007.
4. Baranov V. M., Baevsky R. M., Drescher J., Tank J. et al. Investigations of the cardiovascular and respiratory systems on board the international space station: Experiments «Puls» and «Pneumocard». 53rd Congress IAF, Houston, Oct. 2002.
5. Baevsky R. M., Baranov V. M., Bogomolov V. V. et al. Prospects of development of the medical control automated systems at the ISS on the basis of onboard equipment «Pulse» and «Pneumocard» using. Bremen, 54 IAC, 2003.
6. Баевский Р. М., Лучицкая Е. С., Фунтова И. И., Черникова А. Г. Исследования вегетативной регуляции кровообращения в условиях длительного космического полета. «Физиология», 2013 (в печати).
7. Парин В. В., Баевский Р. М., Волков Ю. Н., Газенко О. Г. Космическая кардиология. Л.: Медицина, 1967. – 206 с.
8. Баевский Р. М., Кириллов О. И., Клецкин С. З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М. «Наука», 1984, 235 с.
9. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // Circulation. – 1996. – Vol. 93. – P. 1043–1065.
10. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. Вестник аритмологии, 2001, 24, с. 69–85.
11. Григорьев А. И., Баевский Р. М. Концепция здоровья и космическая медицина. М., «Слово», 2007, 208 с.
12. Казначеев В. П., Баевский Р. М., Берсенева А. П. Донозологическая диагностика в практике массовых обследований населения. – Л.: Медицина, 1981, 196 с.
13. Баевский Р. М., Берсенева А. П. Введение в донозологическую диагностику. М., «Слово», 2008, 208 с.
14. Черникова А. Г. Оценка функционального состояния организма в условиях длительного космического полета на основе анализа вариабельности сердечного ритма. Автореф. канд. дисс., М., 2010, 24 с.
15. Баевский Р. М., Черникова А. Г. К проблеме физиологической нормы: Математическая модель функциональных состояний на основе анализа вариабельности сердечного ритма. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2002, № 6, С. 11–17.
16. Баевский Р. М., Берсенева Е. Ю., Дресчер Ю., и др. Компьютерные системы для исследования кровообращения и дыхания на борту международной космической станции. Материалы 12-й конференции по космической биологии и авиакосмической медицине. М., 2002, с. 38–39.
17. Baevsky R. M., Funtova I. I., Diedrich A., Chernikova A. G., Drescher J., Baranov V. M., Tank J. Cardiac function measured by impedance cardiography is maintained during long term space flight. 59 IAC, Glasgow, Scotland, 2008.
18. И. И. Фунтова, А. Г. Черникова, И. Н. Федорова, В. М. Баранов, И. Танк, Р. М. Баевский. Некоторые результаты научного эксперимента «Пневмокард на борту МКС. 17th IAA Humans in Space Symposium Moscow, Russia, June 7–11, 2009.
19. А. Г. Черникова, И. И. Фунтова, Р. М. Баевский. Оценка функционального состояния членов экипажей МКС на основе анализа вариабельности сердечного ритма. 17th IAA Humans in Space Symposium Moscow, Russia, June 7–11, 2009.
20. I. Funtova, R. Baevsky, E. Luchitskaya, I. Slepchenkova, J. Drescher, J. Tank. Day-vs. night time heart rate variability

changes in microgravity: experiments «Pneumocard» and «Sonocard». 62nd International Astronautical Congress, 2011, ID: 10491.

21. A. G. Chernikova, R. M. Baevsky, I. I. Funtova. The probability approach to an estimation of risk of a pathology at cosmonauts according to analysis HRV., ISHNE-2011, Moscow, April, 2011.

## Studying of long weightlessness influence on autonomic regulation of blood circulation at crew members of the international space station. Space experiment «Pneumocard»

R. M. Baevsky, I. I. Funtova  
E. S. Luchitskaya, A. G. Chernikova  
Institute of biomedical problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow

### Abstract

The article presents results of space experiment «Pneumocard», which was held onboard the International space station (ISS) from March, 2007 till December, 2012, are described in article. Experiment was conducted monthly. All Russian crew members of ISS participated in it. 25 cosmonauts have taken part in 226 investigations (130 investigations — onboard ISS, 50 investigations before flight and 46 — after flight).

The experiment «Pneumocard» is devoted to studying the effect of space flight factors on the autonomic regulation of blood circulation, breath and cardiac contractility at long space flights. The purpose of space experiment — to provide new scientific information to deepen the representations about mechanisms cardiorespiratory systems adaptation to conditions of prolonged space flight.

During the experiment following physiological signals were recorded: the electrocardiogram, the impedance cardiogram, the seismocardiogram, pneumotachogram, a finger photoplethysmogram. Researches onboard ISS were spent by means of a specialized hardware-software complex «Pneumocard». The complex, weighing 200 gramm with electrodes, sensors and connecting wires, was placed on a breast belt of the cosmonaut and provided comfort for experimental researches in microgravity. The recorded information was stored in memory of the onboard computer and transmitted to the Earth via Internet, as well as it was delivered in the form of magnetic recordings when returning crews to the Earth.

The heart rate variability (HRV) analysis, aimed at assessing the features of autonomic regulation of blood circulation, has an important place in data analysis. It is shown that at beginning of the flight, as a rule, there is increased activity of parasympathetic regulation, then there

is a mobilization of additional functional reserves (increase the total power of the HRV spectrum). In the middle and in the end of flight, growth of activity of the sympathetic centers of vascular tone regulation (low-frequency range of HRV spectrum) is usually marked. However, there were marked individual specific features of autonomic homeostasis reconfiguration during flight because of the different individual types of autonomic regulation. Therefore, the development of mathematical model of the functional states, considering individual type of autonomic regulation, had great importance.

The greatest interest for practice of medical support of space flights are the results of applying the prenosological approach and methods for probabilistic assessment of risks. The efficiency of a phase plane method application for displaying a trajectory of changes in the functional state at different stages of flight is shown. The results of assessment of a functional status and risk of pathology development at all Russian crew members of ISS are presented. Average categories of risk were in the preflight period — 2,08; during flight — 3,04; after flight — 3,36.

The presented materials show that the use of HRV analysis in combination with the prenosological diagnostics methods and the probabilistic approach for estimating the risk of disease can be applied with advantage in practice of medical support of space flights.

**Key words:** cardiovascular system, autonomic regulation, mechanisms of adaptation, heart rate variability, functional reserves, a degree of a stress, a likelihood estimation, a category of risk.

## Вивчення впливу тривалої невагомості на вегетативну регуляцію кровообігу у членів екіпажів міжнародної космічної станції. Космічний експеримент «Пневмокард»

*Р. М. Баєвський, І. І. Фунтова  
Є. С. Лучицька, А. Г. Чернікова*  
Інститут медико-біологічних проблем РАН, Москва

### Резюме

У статті представлені результати космічного експерименту «Пневмокард», який щомісяця проводився на борту Міжнародної космічної станції (МКС) з березня 2007 р. по грудень 2012 р. Всього в дослідженнях взяли участь 25 космонавтів, проведено 226 досліджень. Експеримент «Пневмокард» присвячений вивченню впливу чинників космічного польоту на вегетативну регуляцію кровообігу, дихання і скоротливу функцію серця в тривалому космічному польоті. Дослідження на борту МКС проводилися за допомогою спеціалізованого апаратно-програмного комплексу «Пневмокард».

При аналізі даних значне місце займав аналіз варіабельності серцевого ритму (ВСР), спрямований на оцінку особливостей вегетативної регуляції кровообігу. Є виражені індивідуальні особливості перенастроювання вегетативного гомеостазу в процесі польоту, що обумовлено різними індивідуальними типами вегетативної регуляції. Найбільший інтерес для практики медичного забезпечення

космічних польотів представляють результати застосування донозологічного підходу і методів ймовірнісної оцінки ризику розвитку патології.

**Ключові слова:** кардіореспіраторна система, вегетативна регуляція, механізми адаптації, варіабельність серцевого ритму, функціональні резерви, ступінь напруги, ймовірнісна оцінка, категорія ризику.

### Переписка

д.м.н., професор **Р. М. Баєвський**  
Государственный научный центр  
РФ — Институт медико-биологических  
проблем РАН  
Хорошевское шоссе, 76 А  
Москва, 123007, Россия  
эл. почта: rmb1928@mail.ru