

УДК 613.614:613.693

# Исследование функционального состояния организма во время сна в условиях длительной невесомости. Космический эксперимент «Сонокард»

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

## Резюме

Целью космического эксперимента «Сонокард» являлась разработка предложений по совершенствованию системы медицинского контроля за космонавтами на основе использования метода бесконтактного съёма физиологической информации в период сна. Космический эксперимент «Сонокард» в течение 2007–2012 гг. был проведен у 22 Российских космонавтов в 17 экспедициях на МКС.

В процессе выполнения эксперимента «Сонокард» методом сейсмокардиографии регистрировались микроколебания тела космонавта, связанные с сердечными сокращениями, дыханием и двигательной активностью. Важнейшей особенностью проводившегося космического эксперимента является использование бесконтактной методики регистрации физиологических функций, что обеспечивало простоту, комфортность и физиологичность исследований. Бортовой прибор «Сонокард» выполнен в виде компактного устройства, которое размещается в нагрудном кармане майки-футболки. Центральное место при анализе данных занимал анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР), позволяющий судить об уровне стресса, о вегетативной регуляции системы кровообращения. Впервые в условиях длительного космического полета получены данные о состоянии различных звеньев системы вегетативной регуляции в ночной период суток на разных этапах полета.

**Ключевые слова:** бесконтактный съём физиологической информации, микроколебания тела, сейсмокардиография, вегетативная регуляция, вариабельность сердечного ритма, сон, качество сна, степень напряжения, восстановленные функциональные резервы.

Клин. информат. и Телемед.  
2013. Т.9. Вып.10. с.59–74

## Введение

Изучение цикла «сон–бодрствование» в новых для человека условиях длительного пребывания на борту космических объектов имеет важное практическое значение. Это обусловлено исключительной биологической ролью сна как восстановительной фазы в циклах жизнедеятельности организма. Несмотря на то, что изучению сна в условиях космического полета посвящено большое количество исследований [1], задача изучения эффективности восстановительных процессов в этих условиях является принципиально новой. Как известно, процессы восстановления во время сна сопровождаются смещением вегетативного баланса в сторону преобладания парасимпатического звена регуляции. Эти процессы могут контролироваться на основе использования методов анализа вариабельности сердечного ритма [2, 3].

До сих пор вегетативный баланс в космических полетах исследовался только в дневное время в течение рабочего дня. Здесь наряду с влиянием специфического фактора — невесомости на организм космонавта действуют «производственные» факторы, такие как психоэмоциональное напряжение и физические нагрузки (ежедневные физические тренировки). Изучить влияние невесомости «в чистом виде» можно только во время сна. Поэтому теоретический аспект данного исследования состоит в получении новых знаний относительно влияния невесомости на вегетативную регуляцию физиологических функций организма в условиях длительного космического

полета. Практический аспект заключается в изучении возможности оценки качества сна в невесомости, оценки эффективности восстановительных процессов, от чего в значительной мере зависит работоспособность человека и в целом его функциональное состояние. Здесь большое значение приобретает разработка простого и комфортного метода для изучения сна, поскольку существующая полисомнографическая методика из-за своей громоздкости (множество датчиков и электродов, сложность анализа информации) непригодна к практическому использованию в условиях космического полета.

## Методы исследования и основные характеристики научной аппаратуры

### Методика исследований

Важнейшей особенностью проводившегося космического эксперимента «Сонокард» является то, что использовалась бесконтактная методика регистрации физиологических функций, что обеспечивало простоту, комфортность

и физиологичность исследований. Бортовой прибор «Сонокард» является оригинальной отечественной разработкой, на которую оформлен патент [4]. Прибор «Сонокард» был доставлен на борт Международной космической станции в сентябре 2007 года. Первая запись была сделана 19 октября 2007 г. российским членом экипажа МКС-16.

Прибор выполнен в виде компактного устройства (210x140x18 мм), внутри которого расположены: датчик-акселерометр, усилительно-преобразовательное устройство, блок памяти, контроллеры для связи с внешним компьютером и источник питания.

Перед сном космонавт устанавливает прибор в кармане футболки и размещается в спальном мешке (рис. 1). После пробуждения он должен присоединить прибор к бортовому компьютеру и считать из памяти прибора, записанную в течение ночи информацию. Эти данные затем оперативно передаются на Землю по каналам Интернета, а перед возвращением на Землю перезаписываются на карту памяти типа PCMCIA для последующего более детального анализа полученных материалов в лабораторных условиях.

Во время исследования датчик прибора регистрирует микроколебания грудной стенки, являющиеся проявлением механической работы сердца. Одновременно воспринимаются и все другие колебания, обусловленные дыханием, двигательной активностью человека или внешними воздействиями (рис. 2). Поскольку эти посторонние колебания могут иметь амплитуду во много раз превышающую сигналы, связанные

с сердечными сокращениями, то получаемые итоговые записи, требуют специальной обработки для выделения полезной информации. Специализированное программное обеспечение «Согг» решает задачи распознавания и измерения непрерывного динамического ряда длительностей кардиоинтервалов в течение всего времени записи (в течение ночи). Для решения этой задачи был выбран метод эталонов, при котором строится кросскорреляционная функция текущего сигнала с выбранным типичным сейсмо- или баллистокардио-комплексом. Программа обеспечивает цифровую фильтрацию сигналов и затем распознавание отдельных комплексов и измерение временных интервалов между ними.

Наряду со своей главной задачей по построению кардиоинтервалограммы по всей ночной записи программа «Согг» обеспечивает также оперативное выделение и измерение длительности помех, в основном связанных с двигательной активностью (ДА). Расчет параметров ДА происходит автоматически на основе анализа мощности сигнала. Кроме того, программа осуществляет выделение и измерение дыхательных движений путем низкочастотной фильтрации сейсмо- или баллистокардиограммы. Специальная функция экспресс-анализа позволяет быстро получать данные о частоте пульса, частоте дыхания и двигательной активности обследуемого лица в течение ночи.

Космический эксперимент «Сонокард» в течение 2007–2012 гг. был проведен у 22 Российских космонавтов в 17 экспедициях на Международной Космической

Станции (МКС). Всего проведено 302 эксперимента, в том числе в предполетном периоде — 47, во время полета — 215 и в послеполетном периоде — 40. У каждого космонавта исследования проводились по 2–3 раза до полета, в ходе полета с 17 по 28 экспедиции по 2 раза в месяц, начиная с 28-й экспедиции — один раз в месяц и по 2 раза после полета.

## Методики обработки полученных материалов

Центральное место при анализе данных бесконтактной регистрации физиологических сигналов занимает анализ variability сердечного ритма (ВСР). Программа «Согг» выделяет для анализа ВСР 5-минутные участки, свободные от двигательной активности и артефактов, и в каждом из них вычисляет стандартные временные и частотные показатели ВСР. Анализ и физиологическая интерпретация показателей ВСР проводились в соответствии с рекомендациями группы Российских экспертов [5] и стандартам Европейского общества кардиологов и Североамериканского общества по электростимуляции и электрофизиологии [6]. Анализ variability сердечного ритма (ВСР) — это современная методология и технология исследования и оценки функционального состояния организма и, в частности, состояния различных отделов вегетативной нервной системы. Космическая медицина была одной из первых областей науки и практики,

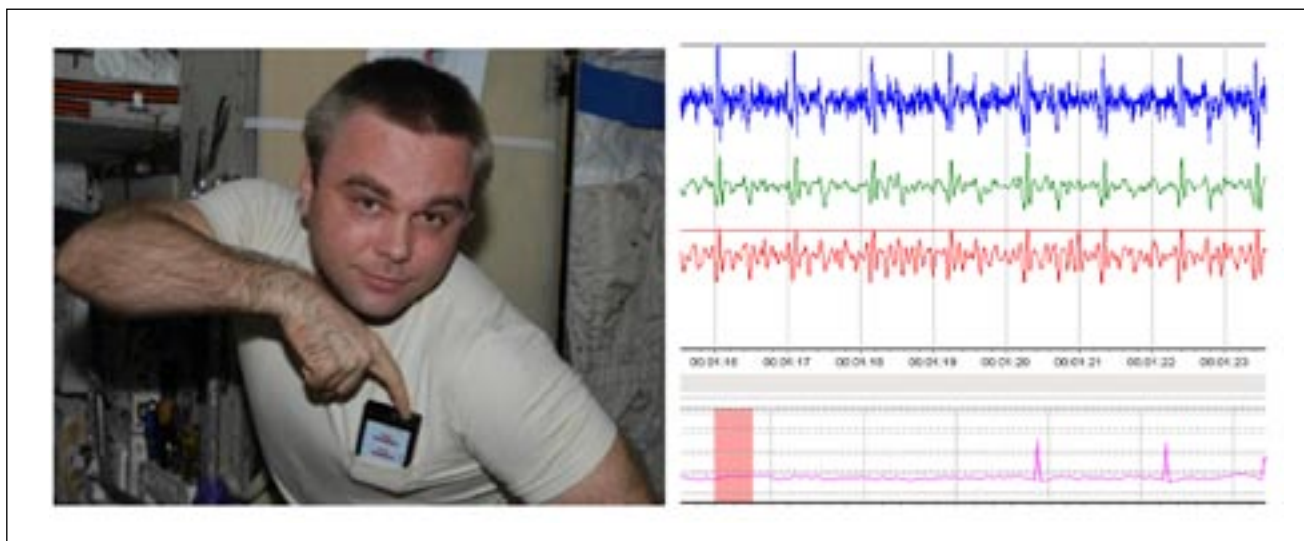


Рис. 1. Проведение научного эксперимента «Сонокард» на борту МКС (слева) и работа программного обеспечения по анализу сигналов (справа).

где анализ ВСР был использован для получения новой научной информации и решения задач медицинского контроля за человеком, выполняющим свою работу в экстремальных условиях [7, 8, 9, 10, 11]. Поскольку систематические исследования функционального состояния организма во время сна в условиях длительной невесомости проводятся впервые, специальное внимание было обращено на индивидуальные особенности вегетативной регуляции функций.

## Результаты исследований

### 1. Динамика средних значений комплекса физиологических показателей во время сна на разных этапах полета

В табл. 1 представлены средние значения основных показателей анализа ВСР в эксперименте «Сонокард». Как следует из этих данных среднеполетные изменения частоты пульса были значительно ниже во время полета и достоверно более высокими в послеполетном периоде. Анализ показывает, что в полете наблюдаются статистически значимые изменения вегетативного баланса. Снижается активность парасимпатического звена регуляции (HF), растет активность подкоркового симпатического сосудистого центра (LF), уменьшается мощность звеньев энерго-метаболического звена регуляции (VLF).

Эти изменения суммируют данные, полученные у всех 22-х членов экипажей МКС и свидетельствуют об общих тенденциях. Послеполетные изменения более отчетливо и с более высокой достоверностью указывают на рост частоты пульса и изменение вегетативного баланса в сторону активного преобладания тонуса симпатического звена регуляции (рост Ин; LF, % и VLF, %; уменьшение рNN50 и HF, %).

В табл. 2 представлены средненочные значения всех основных показателей на разных этапах полета (до полета, на каждом месяце полета и после полета).

До полета измерения проводились дважды (за два месяца до полета и за 2–3 недели до старта). Как следует из таблицы, различия в значениях всех изме-

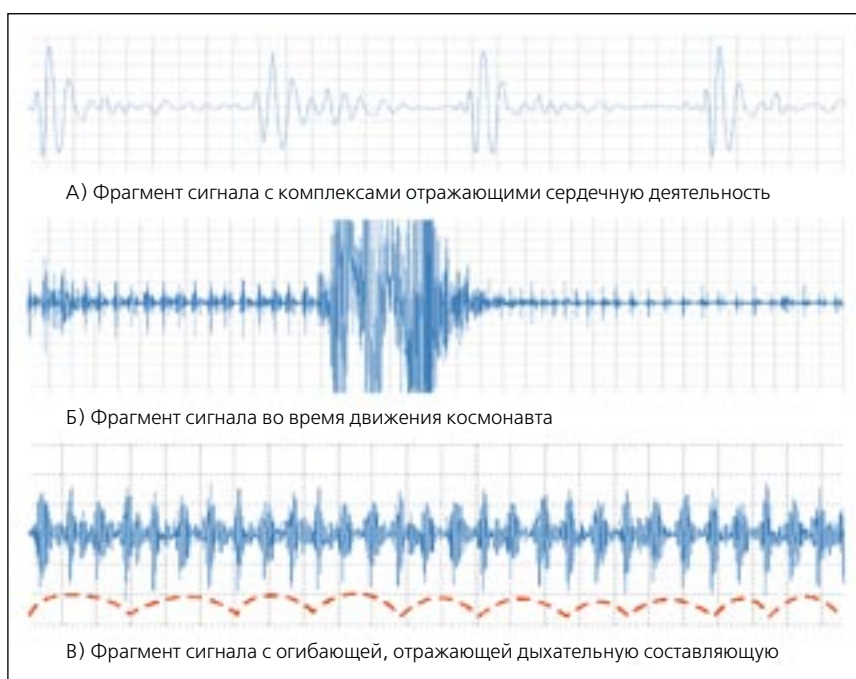


Рис. 2. Фрагменты сигналов, отражающие различные физиологические процессы.

Табл. 1. Средние значения основных показателей анализа ВСР в эксперименте «Сонокард».

Этапы полета	ЧП	Ин	рNN50	HF, %	LF, %	VLF, %
До полета	58,18	90,90	18,66	27,15	42,65	29,8
Полет	55,81*	91,5	18,2	23,9*	48,55*	27,5*
После полета	68,55**	150,14**	9,73**	18,36**	50,31**	31,26**

\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$

рявшихся показателей между 1-м и 2-м измерениями статистически незначимы. Для сравнения с полетными и послеполетными данными были выбраны результаты второго, более близкого к старту измерения.

В полете средненочные данные многих показателей статистически достоверно изменяются. В первый месяц пребывания в невесомости достоверно уменьшается частота пульса и учащается частота дыхания (уменьшается продолжительность дыхательного цикла). Во втором месяце полета отмечается только статистически достоверное уменьшение двигательной активности космонавтов во время сна. Начиная с 3-го месяца и до конца полета отмечается достоверный рост относительной мощности спектра низкочастотных колебаний ВСР, которые отражают

активность симпатического сосудистого центра [5]. С 4-го месяца и до конца полета отмечается достоверное учащение дыхания.

5-й и 6-й месяцы полета показывают достоверное снижение относительной мощности высокочастотных колебаний ВСР, что указывает на рост активности симпатического звена вегетативной регуляции. На 5-м месяце достоверно снижается двигательная активность во время сна.

В послеполетном периоде наблюдаются статистически значимые изменения практически всех показателей. Частота пульса учащается и на 1-е и на 4-е сутки после приземления. Отчетливый сдвиг вегетативного баланса в сторону преобладания активности симпатической нервной системы проявляется уменьше-

Табл. 2. Среднечасовые значения основных показателей ВСР при проведении космического эксперимента «Сонокард».

		ЧСС	SDNN	pNN50	SI	TP	HF, %	LF, %	VLF, %	ЧД	ДА, мин	ДА, %
До полета-1	M	56,44	59,17	25,64	78,85	2848,56	27,93	42,77	29,26	13,79	9,21	2,26
	$\sigma$	7,39	18,49	16,27	55,38	1529,60	10,18	8,06	8,23	1,77	4,16	0,92
	m	1,79	4,48	3,95	13,43	370,98	2,47	1,96	2,00	0,43	1,20	0,22
До полета-2	M	58,31	56,28	20,18	93,40	2963,26	26,98	41,95	29,69	13,84	9,59	2,20
	$\sigma$	6,95	18,78	14,23	61,98	1938,85	8,61	6,86	7,70	2,35	4,38	1,08
	m	1,52	4,10	3,11	13,53	423,09	1,88	1,50	1,68	0,51	1,09	0,24
1-й месяц полета	M	54,95*	54,85	21,99	83,44	2683,17	25,16	43,56	29,60	11,37*	9,45	2,21
	$\sigma$	7,83	19,23	13,82	60,34	1551,43	11,07	11,06	9,23	2,67	5,18	1,61
	m	1,34	3,30	2,37	10,35	266,07	1,90	1,90	1,58	0,49	1,13	0,28
2-й месяц полета	M	56,46	56,65	21,69	80,57	2752,74	23,45	46,41	28,59	12,17	7,67*	2,01
	$\sigma$	7,78	18,81	14,44	48,25	1367,29	8,56	9,72	7,77	1,77	3,81	0,91
	m	1,33	3,23	2,48	8,27	234,49	1,47	1,67*	1,33	0,32	0,78	0,16
3-й месяц полета	M	56,04	53,11	21,86	85,19	2413,19	24,76	45,18*	27,22	12,02	7,46*	1,95
	$\sigma$	7,08	18,41	13,62	46,20	1266,62	9,14	10,18	7,46	1,82	3,62	1,07
	m	1,25	3,25	2,41	8,17	223,91	1,62	1,80	1,32	0,33	0,83	0,19
4-й месяц полета	M	56,14	54,23	19,92	81,81	2574,84	23,49	46,38*	27,72	11,66*	8,02	1,86
	$\sigma$	7,31	17,59	12,20	43,36	1270,73	10,60	9,87	7,31	2,27	3,35	0,87
	m	1,20	2,89	2,01	7,13	208,91	1,74	1,62	1,20	0,38	0,68	0,15
5-й месяц полета	M	55,54	55,78	20,41	80,38	2942,53	21,51*	47,53*	28,65	11,30*	8,68	2,12
	$\sigma$	7,08	17,69	12,61	49,72	1533,27	6,53	8,96	6,06	2,97	3,99	1,12
	m	1,21	3,03	2,16	8,53	262,95	1,12	1,54	1,04	0,52	0,89	0,19
6-й месяц полета	M	56,24	58,19	23,13	77,52	2860,02	22,93*	45,03*	29,87	11,42*	6,11*	1,52*
	$\sigma$	7,13	19,70	13,47	49,67	1734,79	7,91	7,28	8,18	2,23	1,87	0,87
	m	1,46	4,02	2,75	10,14	354,11	1,62	1,49	1,67	0,46	0,66	0,18
После полета-1	M	68,70*	46,43*	11,16*	157,65*	2013,33*	17,00*	51,00*	33,69	14,58	10,57	2,26
	$\sigma$	11,25	20,74	13,71	105,99	1441,85	6,58	10,27	9,79	2,60	5,28	1,00
	m	2,65	5,03	3,33	25,71	349,70	1,60	2,49	2,37	0,63	1,52	0,24
После полета-2	M	64,03*	46,64:*	10,49:	131,28*	2175,42*	21,52*	48,72*	29,77	14,13	9,80	2,42
	$\sigma$	8,33	14,96	9,34	79,33	1302,20	5,17	5,84	6,83	1,86	3,39	0,87
	m	2,15	4,00	2,50	21,20	348,03	1,38	1,56	1,83	0,50	0,94	0,23

нием величины показателя pNN50 и ростом индекса напряжения регуляторных систем (стресс индекс – SI). При этом достоверно уменьшается суммарная мощность спектра ВСР (TP). Достоверные изменения относительных мощностей спектра ВСР в диапазонах высоких (HF) и низких частот (LF) являются еще

одним признаком увеличения активности симпатического звена вегетативной регуляции.

На рис. 3 представлены графики динамики среднечасовых значений частоты пульса, показателей ВСР, частоты дыхания и двигательной активности на разных этапах космического полета

у Российских членов экипажей МКС (экспедиции 16–32). Они позволяют наглядно проследить обобщенную картину физиологических изменений во время ночного сна в условиях длительной невесомости. На рис. 3А видно, что изменения частоты пульса заметны только в начале полета и отмечается ее значи-

тельный рост в послеполетном периоде. При этом существенно снижается и суммарная вариабельность сердечного ритма (SDNN). Здесь представляет интерес также динамика суммарной мощности спектра ВСП (TP). Этот показатель достоверно уменьшается только в послеполетном периоде, но тенденции его изменений показывают, что в середине полета (на 3–4-й месяцы пребывания в условиях невесомости) отмечается снижение TP, демонстрирующее тенденцию к снижению функциональных резервов регуляторных механизмов.

На рис. 3Б представлена динамика показателей pNN50 и SI, которые отражают соответственно суммарную активность парасимпатического и симпатического звеньев вегетативной регуляции. Их изменения в полете не имеют отчетливой динамики, но в послеполетном периоде хорошо демонстрируют существенный сдвиг вегетативного баланса в сторону роста активности симпатического звена. Увеличение активности симпатических

звеньев механизма вегетативной регуляции во время полета наблюдается на графиках рис. 3В, где видны отчетливый рост LF и уменьшение HF.

Динамика частоты дыхания (рис. 3Г) показывает тенденцию к учащению в полете и урежению в послеполетном периоде. Двигательная активность во время сна (на том же рис. 3Г) в середине полета и особенно в его конце снижается.

Таким образом, средние ночные данные, полученные в условиях длительного космического полета, показывают, что невесомость статистически достоверно вызывает активацию симпатического звена вегетативной регуляции и небольшое увеличение частоты дыхания. Двигательная активность космонавтов во время сна постепенно снижается, что косвенно свидетельствует о снижении нервно-мышечного напряжения. Однако индивидуальные адаптационные реакции членов экипажа в полете характеризуются значительным разнообразием, которое зависит от типа вегетативной регуляции.

## 2. Исследование индивидуальных особенностей вегетативного баланса

В табл. 3 представлены средние значения показателей ВСП до, во время и после полета в пяти различных по типу вегетативной регуляции группах космонавтов.

Как видно из табл. 4 из 22-х исследованных членов экипажей МКС наибольшей была группа с нормо-ваготоническим (НВ) типом регуляции (8 человек). По 6 человек насчитывают группы с ваготоническим (В) и нормотоническим (Н) типами регуляции и по 1 человеку имеют нормо-симпатотонический (НС) и симпатотонический (С) типы регуляции. В табл. 5 представлены средние значения показателей ВСП на разных этапах полета для каждого из типов вегетативной регуляции.

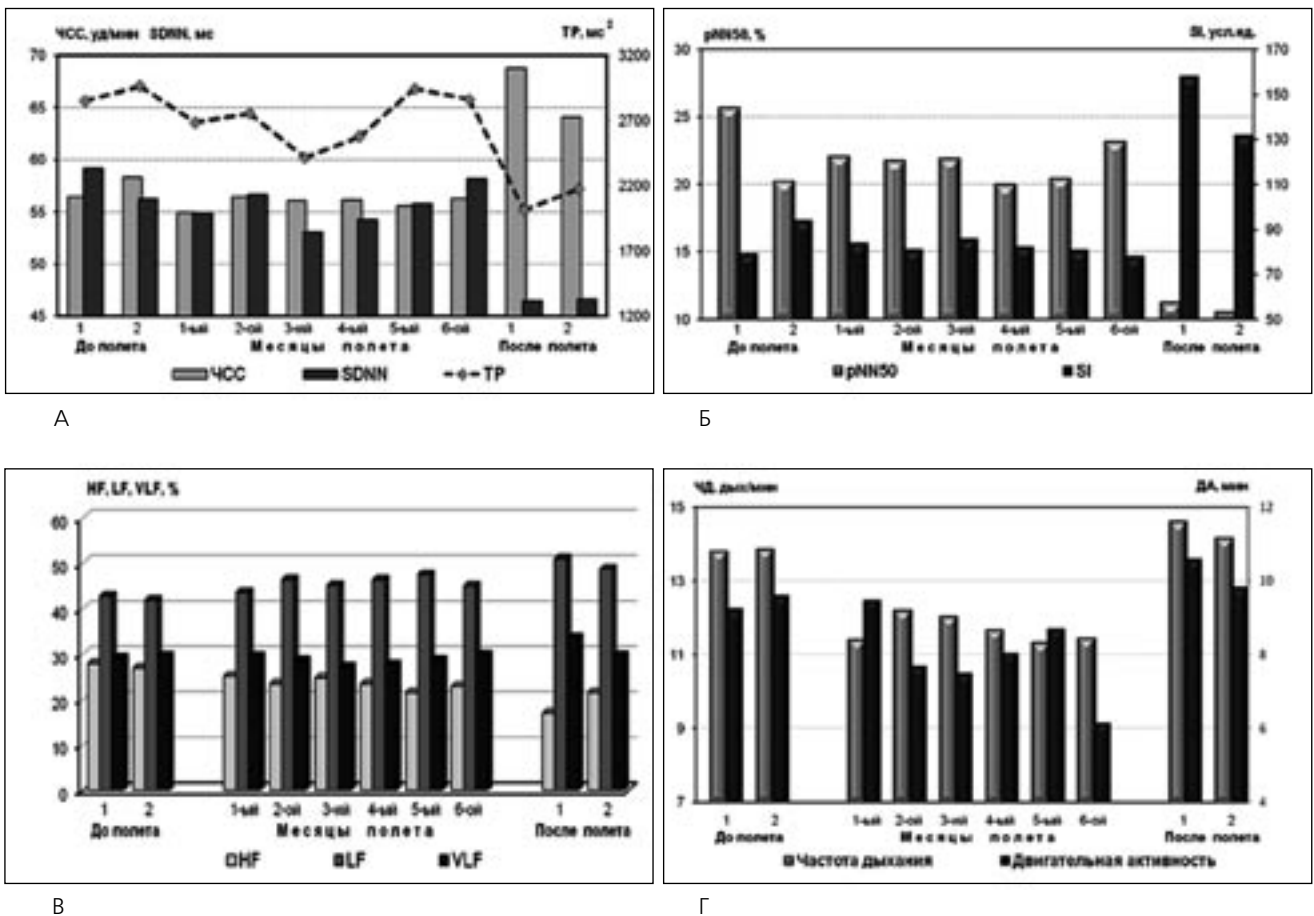


Рис. 3. Графики динамики средненочных значений частоты пульса, показателей ВСП, частоты дыхания и двигательной активности на разных этапах космического полета у Российских членов экипажей МКС (экспедиции 16–32).

**Табл. 3. Средние значения показателей ВСП на разных этапах космического полета у космонавтов с различными типами вегетативной регуляции.**

Типы регуляции		ЧП	Ин	pNN50	HF, %	LF, %	VLF, %	n
В	До полета	52,6	80,6	22,83	26	45	29	6
	В полете	47,6*	64,8*	21	21*	49,4*	29,8	
	После полета	63,4*	104,8*	12,8*	17,4*	47,2	35,2*	
НВ	До полета	57,5	73,8	20,2	28,2	40,4	31,2	8
	В полете	54*	65,3	22,5	26,5	48	25,4*	
	После полета	63,3*	94,8*	15*	19,5*	50,8	29,5	
Н	До полета	63	134,1	11,1	26,6	43,3	28,6	6
	В полете	61	124,3	12	25,3	48	26,3	
	После полета	75,4*	240*	8,2*	19*	51,6	29,4	
НС	До полета	58	48	28	36	41	23	1
	В полете	69	121	8	22	51	27	
	После полета	97	363	0	10	56	34	
С	До полета	68	72	18	19	44	37	1
	В полете	75	234	0,5	13	49	38	
	После полета	73	202	3	20	50	30	

**Табл. 4. Определение типа вегетативной регуляции по средней частоте пульса в условиях длительной невесомости.**

Типы вегетативной регуляции	Средняя частота пульса в условиях невесомости, уд/мин
В (ваготонический)	50 и меньше
НВ (нормо-ваготонический)	51–60
Н (нормотонический)	61–65
НС (нормо-симпатотонический)	66–70
С (симпатотонический)	Выше 70

Как видно из представленных данных, космонавты с разными типами вегетативной регуляции по-разному реагируют на условия длительной невесомости. У космонавтов с ваготоническим типом регуляции в полете отмечается статистически достоверное снижение частоты пульса, индекса напряжения, и относительной мощности спектра ВСП в высокочастотном диапазоне (HF, %). В низкочастотном диапазоне (LF, %) мощность спектра ВСП достоверно растет. При нормо-ваготоническом типе вегетативной регуляции определяется достоверное снижение частоты пульса

и относительной мощности спектра ВСП в очень низкочастотном диапазоне (VLF, %). В группах с нормотоническим типом регуляции достоверных изменений показателей ВСП в полете не выявляется. Таким образом, адаптационные реакции во всех группах имеют одинаковую направленность, но их выраженность максимальна у космонавтов с ваготоническим типом регуляции.

Предварительное разделение на группы проводилось по индивидуальным значениям частоты пульса, усредненным за весь период пребывания в условиях невесомости (табл. 4).

Что касается космонавтов с нормо-симпатотоническим и симпатотоническим типами регуляции, то направленность их реакций аналогична остальным группам, но реакции выражены более резко, а изменения индекса напряжения, pNN50, HF, % и LF, % указывают на высокую активацию симпатического отдела вегетативной нервной системы.

В послеполетном периоде реакция всех космонавтов была однозначной, но с разной степенью выраженности. Наиболее выраженной была реакция у космонавтов с нормотоническим типом регуляции.

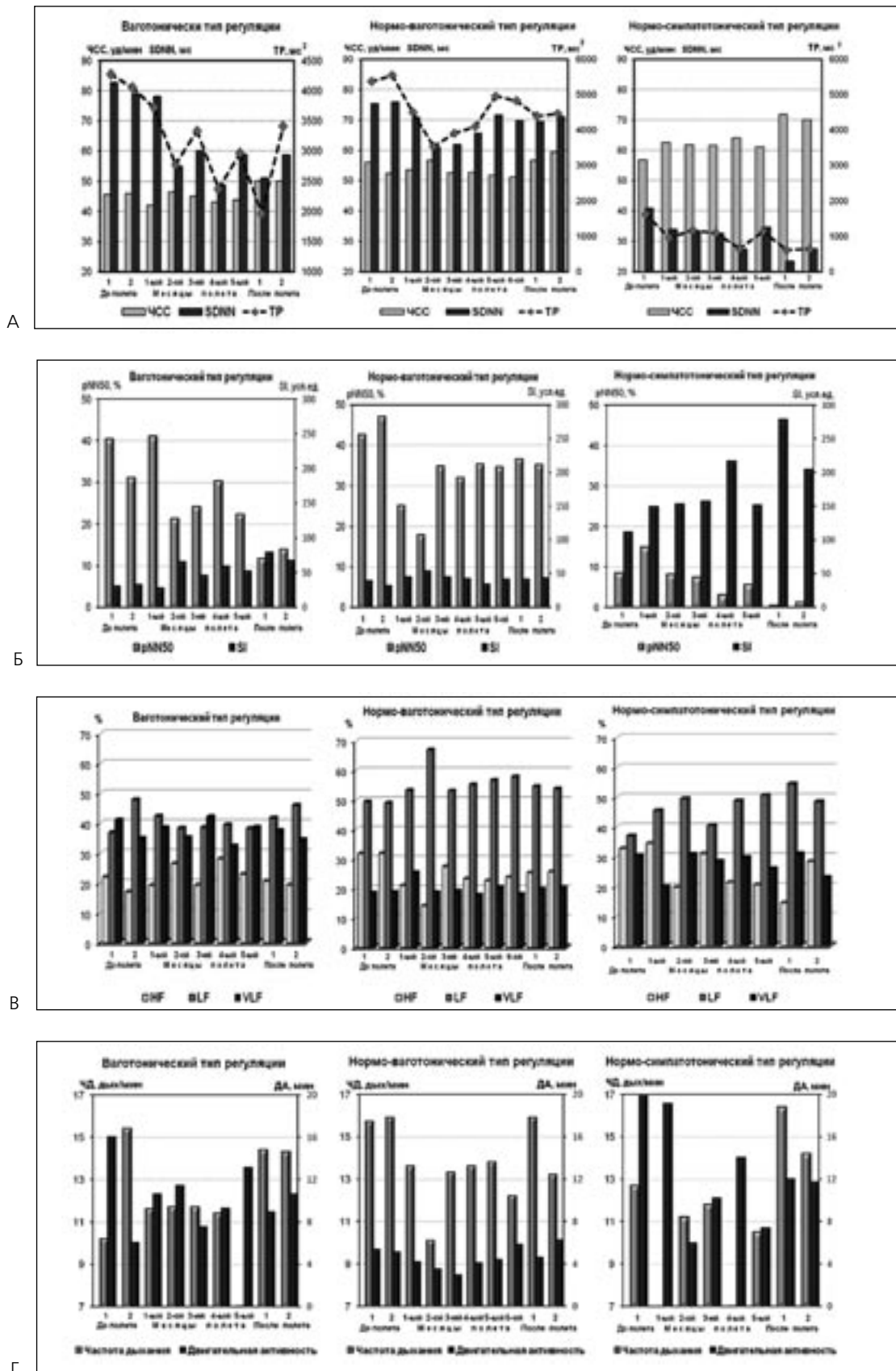


Рис. 4. Образцы индивидуальных реакций космонавтов с различными типами вегетативной регуляции на разных этапах космического полета. В — ваготонический тип вегетативной регуляции, НВ — нормо-ваготонический тип вегетативной регуляции, НС — нормо-симпатотонический тип вегетативной регуляции.

На рис. 4 представлены образцы индивидуальных реакций космонавтов с различными типами вегетативной регуляции на разных этапах космического полета. Здесь сопоставлены графики, полученные по данным исследований космонавтов К1, К2 и К3, которые относятся к типам регуляции В, НВ и НС соответственно. Графики ЧСС и SDNN (рис. 4А) показывают, что у НВ выше, чем у В, не только ЧСС, но и SDNN. Однако, у НС при еще более высокой частоте пульса величина SDNN ниже. Представленный на графиках одновременно и показатель TP, который характеризует относительный запас функциональных резервов регуляторного механизма, показывает, что он наиболее высок в полете у НВ и наиболее низкий у НС.

Это объясняет, почему у НС наиболее высокая ЧСС. По-видимому, высокая активность симпатической системы ведет к повышенному расходованию функциональных резервов, что компенсаторно проявляется повышением ЧСС. Это подтверждается графиками на рис. 4Б. Здесь видно, что у НС отмечаются наиболее высокие значения SI и очень низкие значения rNN50, что свидетельствует о значительном сдвиге вегетативного баланса в сторону симпатического звена регуляции. Соответственно у НВ по сравнению с В более высокие значения SI и более низкие значения rNN50. Спектральный анализ ВСР (рис. 4В) показывает, что у космонавта с ваготоническим типом вегетативной регуляции по сравнению с другими космонавтами наблюдается самое высокое значение относительной мощности очень высокочастотных колебаний (VLF, %). Вместе с высоким значением LF, % это указывает на сравнительный рост индекса централизации, т. е. на значительное

преобладание активности центрального контура регуляции над автономным, что не является характерным для ваготоников. Это можно объяснить только активацией надсегментарных структур, обеспечивающих мобилизацию функциональных резервов организма.

На рис. 4Г представлены данные о частоте дыхания и двигательной активности. Видно, что нормо-симпатотоник отличается более высокой частотой дыхания и повышенной двигательной активностью во время сна.

### 3. Оценка процессов восстановления функциональных резервов организма во время сна в условиях невесомости

Качество сна и эффективность процессов восстановления функциональных резервов могут быть оценены путем сопоставления данных первого и последнего часа сна. Даже по изменениям ЧСС видно, что разностные значения показателей дают важную информацию о качестве сна. (рис. 5). Более информативными являются показатели variability сердечного ритма. Как известно, ночь – это царство вагуса. Во время сна усиливается активность парасимпатической системы, которая минимизирует расходование функциональных ресурсов организма и содействует их восстановлению. Защитно-восстановительная функция парасимпатической системы очень важна для людей, выполняющих свою профессиональную деятельность в условиях

стрессорного воздействия факторов окружающей среды. Поэтому представляет большой интерес оценка изменений вегетативной регуляции в течение ночи на разных этапах полета.

Для определения возможности оценки качества сна по разностным значениям показателей variability сердечного ритма были проведены специальные сравнительные исследования с использованием метода полисомнографии [12].

Изучалась взаимная корреляция между показателями полисомнограммы и результатами анализа ВСР. При этом учитывались следующие показатели полисомнограммы: индекс сна, длительность засыпания, длительность бодрствования, эффективность сна, длительность стадии быстрого сна, число циклов сна. По данным анализа ВСР вычислялись: разностные значения ЧСС, SDNN, rNN50, SI. Показано, что наиболее высокая корреляция отмечается между данными полисомнографии и показателями активности симпатического (SI) и парасимпатического (rNN50) звеньев регуляции.

На рис. 6 приводятся графики динамики показателей rNN50 и SI, отражающих, соответственно состояние парасимпатической и симпатической систем регуляции. Приводятся данные двух членов экипажа (К1 и К2) одной экспедиции на МКС, находившихся в течение полета в одинаковых условиях. Эти графики показывают, что у каждого из космонавтов был свой индивидуальный тип реагирования на воздействие факторов длительного космического полета. Космонавт 1 до полета отличался более низкими значениями rNN50 и более высокими значениями SI. Эти различия сохранялись и во вре-

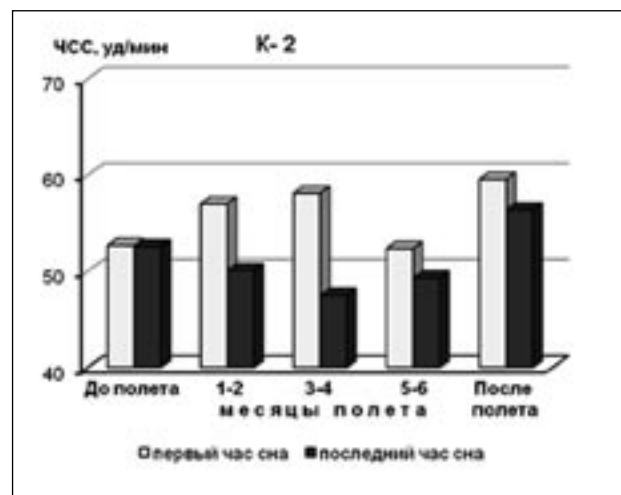
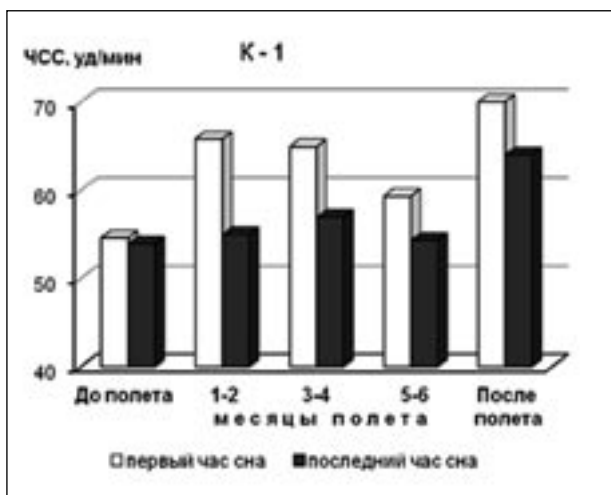


Рис. 5. Вечерние и утренние значения ЧСС у двух членов (К1 и К2) одного экипажа на разных этапах полета.



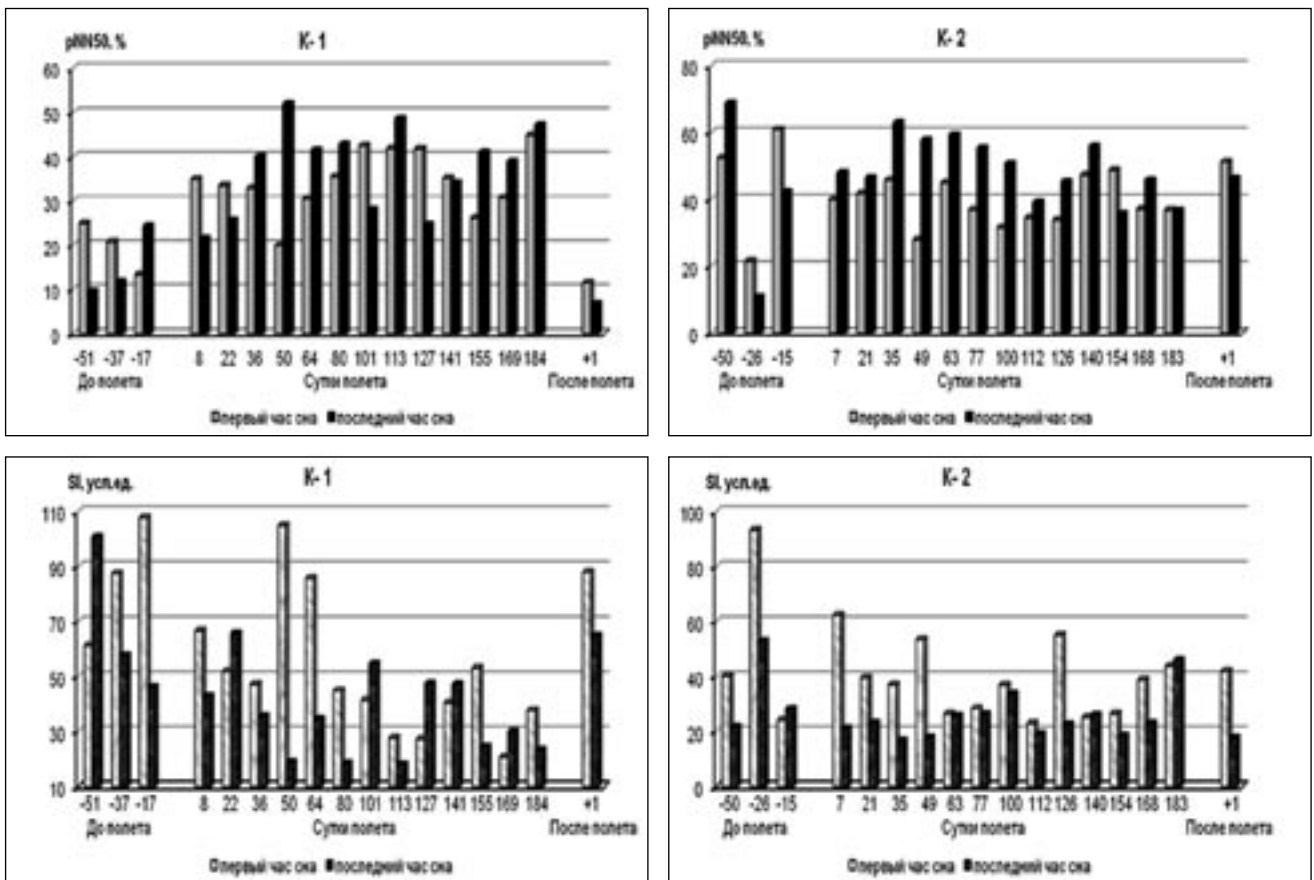


Рис. 6. Изменения показателей  $rNNS50$  и  $SI$  у двух членов экипажа (K1 и K2) одной экспедиции в начале ночи (светлые столбики) и в конце ночи (темные столбики) на разных этапах длительного космического полета.

мя полета. При этом различия между вечерними и утренними значениями этих показателей также имели индивидуальные особенности. У космонавта 1 более выраженными были изменения  $SI$ , а у космонавта 2 — изменения  $rNNS50$ . Эти изменения были наиболее выраженными на 2–3-м месяцах полета. Снижение  $SI$  в утренние часы отражает результат процессов восстановления, протекающих в течение ночи. Степень этого снижения в определенной степени характеризует качество сна как восстановительного процесса.

Как видно из представленных данных, у 1-го космонавта в отдельные дни (на 36-е сутки полета, а также на 113-е, 141-е, 155-е и 184-е сутки) наблюдались случаи более высокого по сравнению с вечером утреннего значения  $SI$ . Это может указывать на недостаточное восстановление функциональных резервов и, возможно, на развитие утомления. У 2-го космонавта подобная картина наблюдалась лишь в конце полета (на 183 сутки).

Изменения показателя  $rNNS50$  в течение ночи у 1-го космонавта на 8-е и 22-е сутки полета характеризовались снижением его значений в утренние часы.

В дальнейшем  $rNNS50$  был всегда выше в утренние часы, кроме 101-х и 127-х суток. У 2-го космонавта показатель  $rNNS50$  в течение всего полета в утренние часы имел более высокие значения. Рост  $rNNS50$  и снижение  $SI$  являются признаками смещения вегетативного баланса в сторону преобладания парасимпатического звена регуляции. В начале 2-го месяца пребывания в условиях невесомости у 1-го космонавта к концу ночи были повышены значения  $SI$ , и снижены значения  $rNNS50$ . Такое сочетание изменений, указывающее на активацию симпатического звена регуляции в утренние часы можно интерпретировать как результат активации подкорковых нервных центров со стороны надсегментарных отделов мозга. Это результат «вмешательства» более высоких уровней управления в работу нижележащих нервных центров, которое может быть обусловлено ослаблением адаптационного механизма.

Подтверждением этой гипотезы может служить уменьшение суммарной мощности спектра ВСП (ТР) — показателя, который отражает общую активность регуляторного механизма и соответ-

ственно его резервные возможности (рис. 7). До полета средние значения ТР у 1-го космонавта колебались от 960 мс<sup>2</sup> в начале ночи до 1200 мс<sup>2</sup> в конце ночи. У 2-го космонавта соответственно значения ТР были 1320 и 2370 мс<sup>2</sup>. Эти различия отражают разные функциональные резервы систем регуляции, которые вероятнее всего связаны с индивидуальным типом вегетативной регуляции. Во время полета в подавляющем большинстве случаев к концу ночи отмечалось увеличение ТР, что отражает закономерный рост функциональных резервов регуляторного механизма как результат процессов восстановления. Однако у 1-го космонавта на 22-е, 101-е и 127-е сутки полета величина ТР к концу ночи снижалась. Именно в эти дни отмечались неадекватные изменения либо  $SI$  (на 101-е сутки), либо  $rNNS50$  (на 22 и 127-е сутки). По-видимому, снижение ТР как результат активации высших вегетативных центров, было обусловлено влиянием надсегментарных структур на подкорковые нервные центры.

Представленные на примере одного экипажа результаты оценки качества сна в условиях космического полета дают

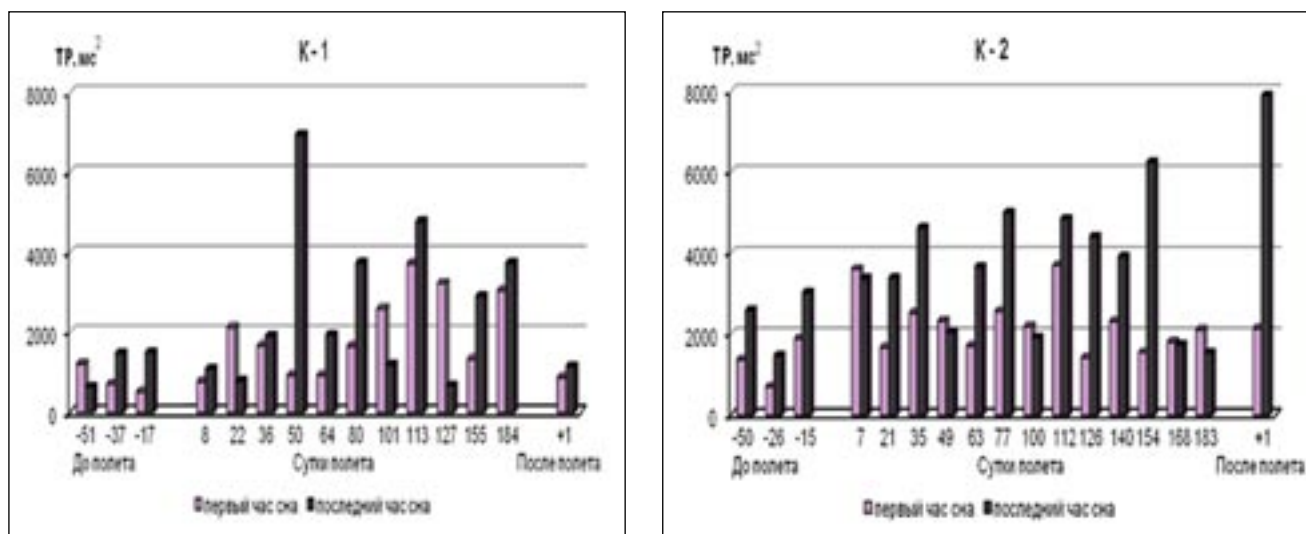


Рис. 7. Изменения суммарной мощности спектра ВСП (TP) у двух членов (K1 и K2) одного экипажа в начале ночи (светлые столбики) и в конце ночи (темные столбики) на разных этапах длительного космического полета.

основание для суждения о процессах восстановления функциональных резервов организма при длительном действии невесомости. Изменения вегетативного баланса в течение ночи являются достаточно отчетливым критерием течения восстановительного процесса.

Признаками эффективного восстановления являются снижение активности симпатического звена регуляции и рост активности парасимпатического звена, а также рост суммарной мощности спектра вариабельности сердечного ритма, указывающий на усиление трофотропных (восстановительных) процессов. В ходе полета у каждого космонавта отмечается определенное число ночей с неадекватной динамикой показателей вегетативного баланса. Так, в представленных примерах у 1-го члена экипажа таких ночей было 4 из 12 исследований (8 ночей с адекватными изменениями показателей), а у 2-го члена экипажа только 1 ночь из 12 (11 ночей с адекватными изменениями показателей). Можно условно оценить качество сна за весь полет соотношением числа ночей с адекватным изменением вегетативного баланса в % к общему числу проведенных исследований. Тогда из представленных данных следует, что качество сна у K1 равно 66,6 % (8/12), а у K2 равно 91,6 % (11/12). Этот показатель был назван среднеполетным показателем качества сна (СПКС). Как показали исследования, среднее значение СПКС для всех обследованных нами членов экипажей МКС составило 77,4 %.

Однако качество сна в невесомости зависит также от индивидуального типа вегетативной регуляции. Об этом свидетельствуют графики на рис. 8, где пред-

ставлены изменения (разница между утренними и вечерними значениями) средних значений ЧП, рNN50 и стресс индекса на разных этапах полета во время сна в невесомости у космонавтов с различными типами вегетативной регуляции.

Как видно из этих данных динамика указанных показателей до полета, в полете и после полета существенно различается. Изменения частоты пульса в процессе сна в полете были менее выражены, чем до полета, а после полета, наоборот были более выраженными. Однако изменения в полете были сравнительно более выраженными у нормо-ваготоников. Рост рNN50 на разных этапах полета в группах с различными типами вегетативной регуляции имел различную выраженность. До и после полета он был наиболее выраженным в группе нормо-ваготоников. Во время полета более значительный рост рNN50 наблюдался у ваготоников, в то время как после полета у них отмечался наименьший рост этого показателя. Изменения стресс индекса в полете были такими же, как и до полета. Однако после полета наиболее значительное снижение величины стресс индекса отмечается у нормотоников

Подобные различия в выраженности изменений показателей ВСП у космонавтов с разными типами вегетативной регуляции представляют как теоретический, так и практический интерес. Практически важно, что наиболее высоким качеством сна отличаются ваготоники (рис. 9).

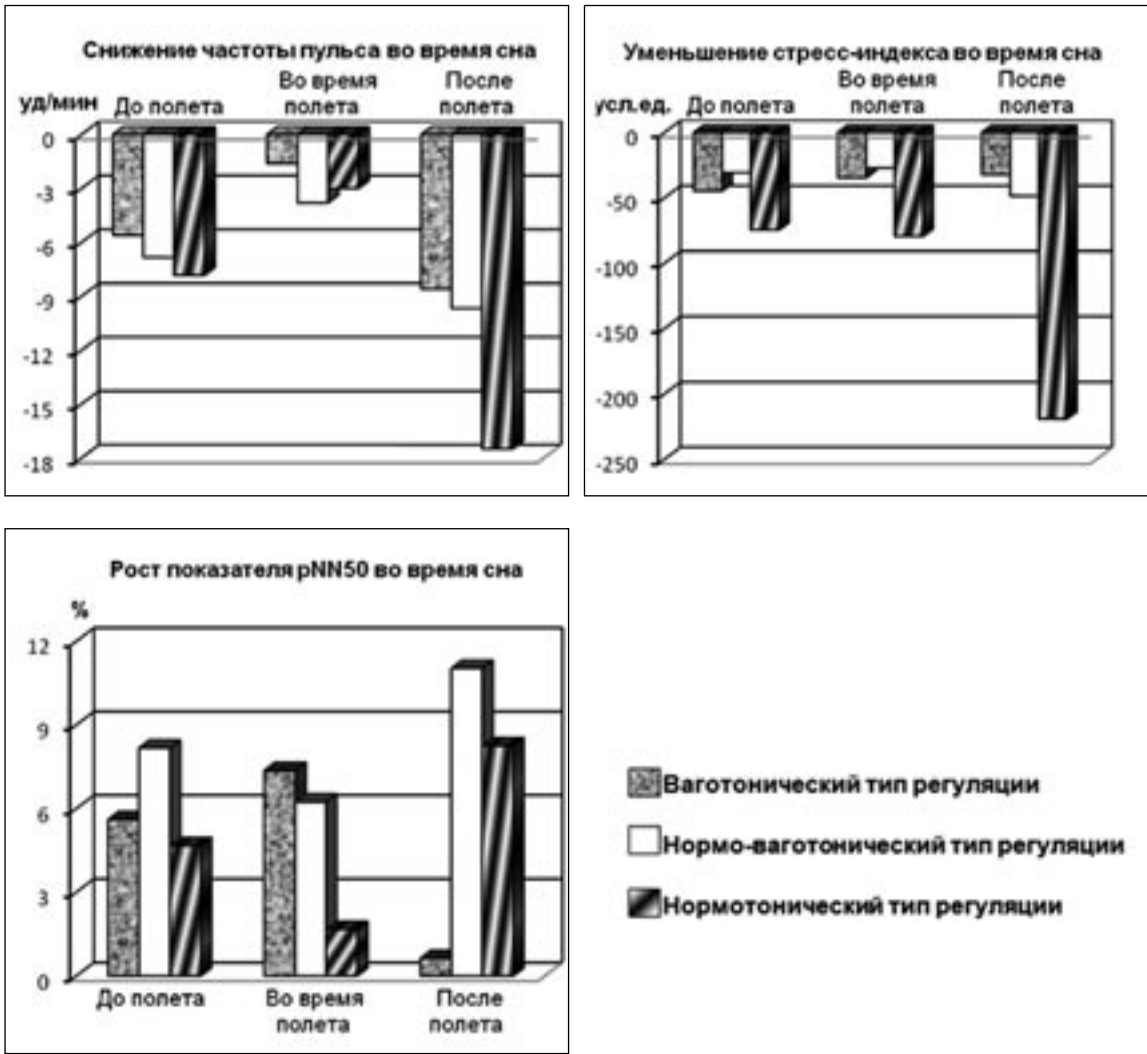
Это, по-видимому, обусловлено тем, что у них парасимпатический отдел вегетативной нервной системы наиболее

активен и быстрее, чем у остальных реагирует на развитие процессов торможения коры головного мозга, связанных с засыпанием. Как видно из графиков на рис. 8, именно показатель рNN50 показал наибольший рост в условиях длительного полета.

Таким образом, показано, что анализ качества сна у членов экипажей МКС по разностным значениям показателей ВСП позволяет количественно оценить степень восстановления функциональных резервов организма во время сна в условиях длительной невесомости. Следует отметить, что субъективная оценка качества сна членами экипажей лишь в 70–80% случаев совпадает с объективными данными. Однако, в большинстве случаев, когда космонавт отмечал, что сон был плохим, это подтверждалось объективно.

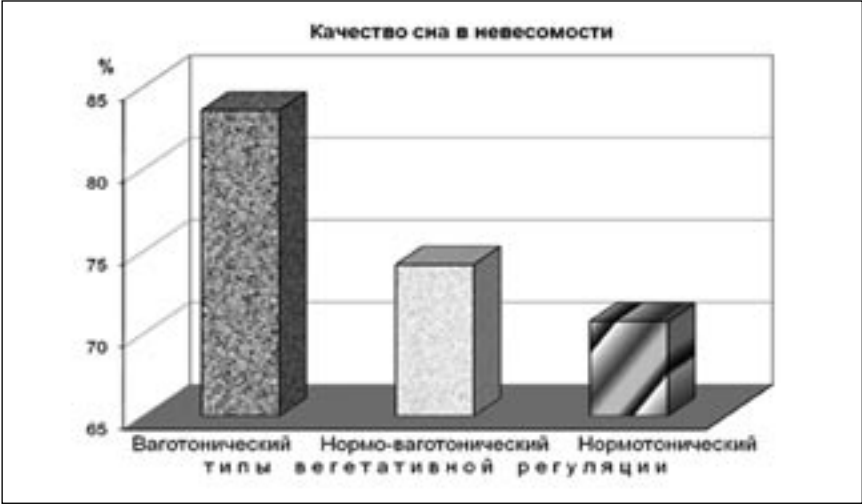
#### 4. Оценка изменений функционального состояния космонавтов во время сна на основе метода математического моделирования

Состояние регуляторных систем, их степень напряжения показывает, каким запасом функциональных резервов располагает организм, до какой степени истощены эти запасы в результате предыдущей работы механизмов регуляции по поддержанию гомеостаза. Для того, чтобы количественно оценить приспособ-



**Рис. 8.** Изменения средних значений ЧП, rNN50 и стресс индекса в процессе сна в невесомости у космонавтов с разными типами вегетативной регуляции. Н-нормотоники, В-ваготоники, НВ-нормо-ваготоники.

бительный эффект, могут быть использованы показатели ВСР, отражающие активность различных звеньев регуляторного механизма. В частности, общий запас функциональных резервов хорошо отражает суммарная мощность спектра ВСР (показатель TP). Однако более целесообразной оказалась разработка интегрального критерия, обобщающего изменения отдельных показателей. С этой целью была предпринята попытка создания математической модели, отражающей весь комплекс наблюдаемых изменений вегетативной регуляции [13]. Наилучшие результаты были получены с помощью дискриминантного анализа, дополнительным преимуществом которого является возможность выделения нескольких канонических переменных, каждая из которых может рассматриваться как самостоятельный



**Рис. 9.** СПКС у космонавтов с разными типами вегетативной регуляции.

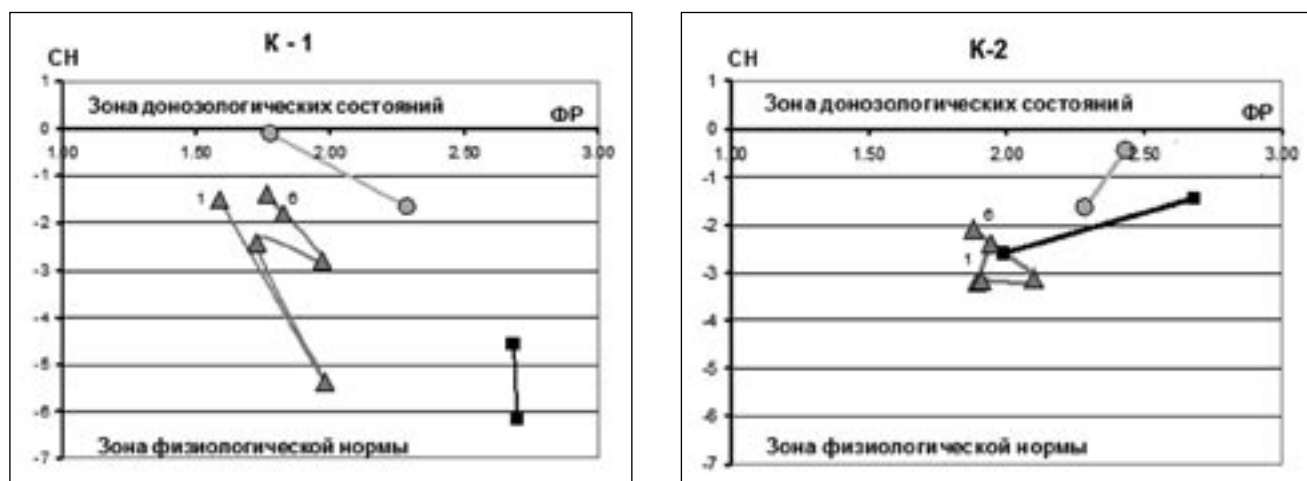


Рис. 10. Фазовые плоскости пространства функциональных состояний во время сна у двух членов одного экипажа МКС.

признак или критерий [14]. В результате пошагового дискриминантного анализа показателей ВСР было получено уравнение дискриминантной функции, которое в стандартизованной форме для первых двух канонических переменных  $L1$  и  $L2$  имеет следующий вид:

$$L1 = -0,112 \cdot HR - 1,006 \cdot SI - 0,047 \cdot rNN50 - 0,086 \cdot HF;$$

$$L2 = 0,140 \cdot HR - 0,165 \cdot SI - 1,293 \cdot rNN50 + 0,623 \cdot HF$$

Анализ стандартизованных коэффициентов этих уравнений показывает, что в первом уравнении наибольший вес имеет показатель  $SI$ , а во втором уравнении — показатели  $rNN50$  и  $HF$ . Поскольку показатель  $SI$  (стресс-индекс) характеризует суммарную активность симпатического отдела вегетативной нервной системы, то каноническую переменную  $L1$  можно считать индикатором активирующей, мобилизующей функции регуляторных механизмов. Вторая каноническая переменная ( $L2$ ), тесно связанная с показателями активности парасимпатического отдела, характеризует восстановительную, защитную функцию регуляторных механизмов (функциональный резерв). Полученные при этом величины  $L1$  и  $L2$  рассматривались как координаты фазовой плоскости, образующей пространство функциональных состояний. При этом по оси абсцисс отображается активность симпатического отдела вегетативной нервной системы, обеспечивающая мобилизацию функциональных резервов (ФР), а по оси ординат — активность парасимпатического отдела, характеризующая вегетативный баланс и отражающая степень напряжения регуляторных систем (СН). В результате формируется пространство состояний, в котором выделяются состояния физиологической

нормы, донозологические состояния, преморбидные и патологические состояния (рис. 10).

Описанная математическая модель, основанная на оценке функционального состояния по двум его компонентам ФР и СН, позволяет рассматривать функциональное состояние организма как непрерывно протекающий динамический процесс. Фазовая плоскость в координатах ФР–СН представляет собой пространство состояний, в котором разворачиваются все события, связанные с изменениями функционального состояния. Этот метод успешно использовался при оценке состояния членов экипажей МКС при проведении космического эксперимента «Пневмокард» [15]. Ниже рассматриваются результаты применения указанного метода к оценке изменений функционального состояния у космонавтов во время сна. В качестве примера на рис. 10 даются фазовые плоскости пространства функциональных состояний у двух членов одного экипажа МКС (K1 и K2).

Прежде всего, следует обратить внимание на то, что траектории функциональных состояний у космонавта K2 располагаются в самой верхней части зоны физиологической нормы, вблизи от зоны донозологических состояний. Результаты предполетных исследований показывают значительную разницу между космонавтами по степени напряжения регуляторных систем (СН). У K1 она значительно ниже: в диапазоне  $(-4,5) - (-6)$  по сравнению с  $(-1,5) - (-2,6)$  у K2. Первое исследование обозначено на графике цифрой 1 и видно, что у космонавта K1 второе исследование, приближенное к моменту старта, отличается лишь ростом степени напряжения СН, а у космонавта K2 наблюдается зна-

чительное снижение функциональных резервов (ФР). После полета различия также весьма существенны. У K1 восстановительный период характеризуется ростом функциональных резервов: ФР растет с 1,8 до 2,3. У K2 ФР падает с 2,4 до 2,2. Во время полета у K1 функциональные резервы к концу полета увеличиваются (с 1,6 до 1,8), а у K2 они снижаются (с 1,94 до 1,88).

На рис. 11 представлена фазовая плоскость пространства функциональных состояний по средним значениям СН и ФР во время сна у всех членов экипажей МКС. Эти данные показывают, что до полета во втором исследовании состояние космонавтов отличается ростом степени напряжения и снижением функциональных резервов. При исследовании после полета вторая запись характеризуется ростом и СН и ФР. Во время полета отмечается постепенный рост ФР и снижение СН.

Поскольку сон является процессом восстановления функциональных резервов и снижения степени напряжения регуляторных систем, представляет интерес использование математической модели для оценки разностных значений этих показателей в начале и в конце периода сна. На рис. 12 представлен график усредненных по всем членам экипажей МКС разностных значений СН и ФР. Как видно, получен весьма наглядный результат. Отчетливо определяется снижение СН и рост ФР во время сна и можно определить, что во время полета рост ФР к концу ночи менее выражен, чем до и после полета. Что касается СН, то с 1-го по 3-й месяцы полета его снижение к моменту пробуждения постепенно возрастает. Затем на 4–5-м месяцах полета степень снижения СН во время сна уменьшается и на 6-м месяце полета становится максимальной.

По-видимому, в будущем разностными значениями СН и ФР более целесообразно пользоваться для оценки качества сна в космических полетах, чем разностными значениями отдельных показателей.

Таким образом, использование математической модели функциональных состояний может дать много полезной информации для системы медицинского контроля.

## 5. Использование прибора «Сонокард» для оценки процессов восстановления после выполнения работ в открытом космосе

Как известно, сон играет ведущую роль в восстановлении функциональных резервов организма. Поэтому большое значение имеет оценка качества сна у космонавтов при выполнении ими различных рабочих операций. Одной из наиболее ответственных операций в космическом полете является выход в открытый космос и внекорабельная деятельность (ВКД) на поверхности Международной космической станции. Такие работы являются большой физической и психоэмоциональной нагрузкой для космонавтов. При этом важно знать резервные возможности организма перед выходом в космос и после возвращения обратно в станцию. Последнее важно как для оценки степени утомления космонавта и его энергетических затрат на выполнение рабочих операций, так и для определения возможности его последующих выходов в открытый космос. Для изучения путей решения этих вопросов был использован имеющийся на борту МКС прибор «Сонокард» [16, 17, 18].

Первичное исследование перед работой в открытом космосе проводилось за 3–10 дней до операции ВКД как плановое. Повторное исследование проводилось в первую ночь после работы в открытом космосе. Исследования проведены с участием трех Российских членов экипажей (К1, К2 и К3). Впервые подобное исследование было проведено 15 ноября 2010 года. В нем участвовали два космонавта (К1 и К3). Космонавт К3 в ходе полета совершил три выхода в открытый космос. Космонавт К2 совершил два выхода в открытый космос.

В табл. 5 и 6 представлены средние ночные значения основных показателей ВСР при выполнении операций ВКД космонавтами К2 и К3. Космонавт К2 за 6 дней до выполнения работ в открытом

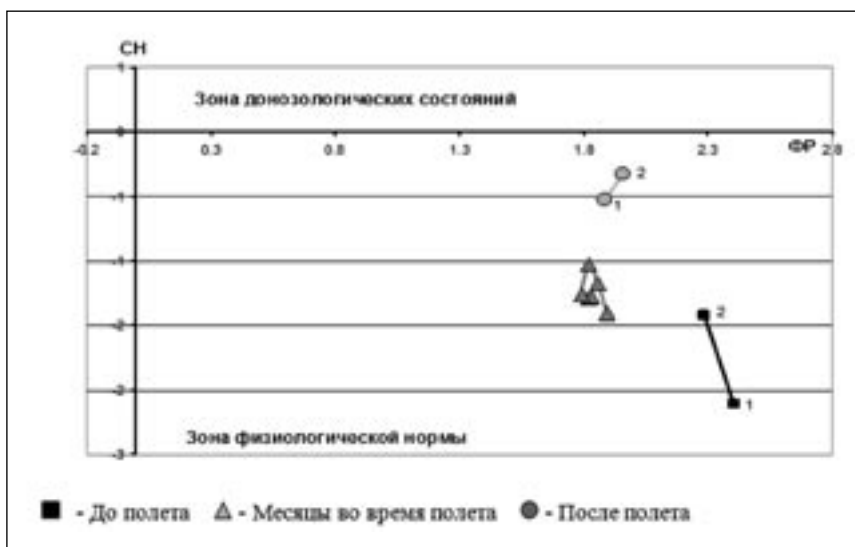


Рис. 11. Фазовая плоскость пространства функциональных состояний по средним значениям СН и ФР во время сна у всех членов экипажей МКС.

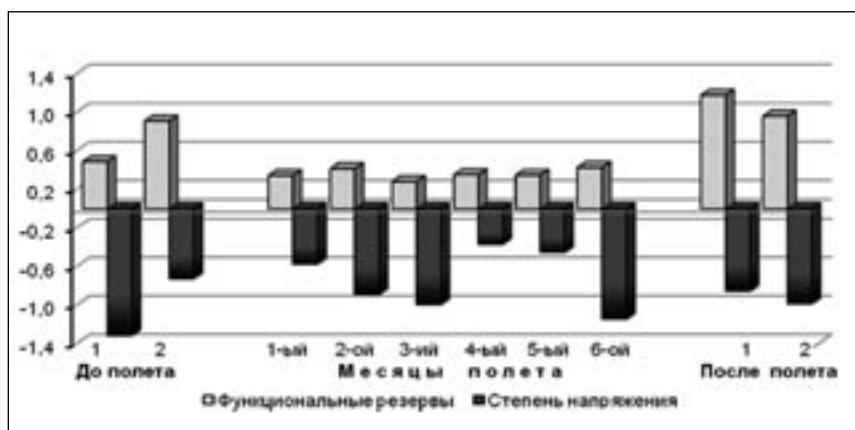


Рис. 12. Разностные значения СН и ФР во время сна на разных этапах космического полета (средние значения по всем исследованным членам экипажей МКС).

космосе (33-й день полета) отличался умеренной брадикардией (средняя ночная частота пульса 47,1 уд./мин) и несколько повышенным значением LF (52,4 %). В ночь после первого выхода в открытый космос частота пульса у него возросла до 54,2 уд./мин, а величина LF выросла до 63,5 %. О наличии явлений функционального напряжения свидетельствовали также снижение величин рNN50, TP и HF, а также рост стресс-индекса (SI).

Перед вторым выходом в открытый космос (на 62-е сутки полета) все средние значения показателей ВСР нормализовались до значений, наблюдаемых перед первым выходом. После второго выхода направленность изменений показателей ВСР была аналогичной первому выходу,

а изменения рNN50, TP и SI были более выраженными. Важно отметить, что после второго выхода в открытый космос наблюдалось более значительное напряжение регуляторных систем, чем после первого выхода.

Таким образом, уже первое исследование показало, что работа в открытом космосе требует высокого напряжения регуляторных систем и ведет к значительному расходованию функциональных резервов. Последующие исследования подтвердили этот вывод и показали, что при повторных ВКД утомление в организме накапливается и каждый последующий выход в открытый космос требует все большего напряжения регуляторных систем.

В табл. 6 представлены аналогичные данные для космонавта К3, который

Табл. 5. Изменения средних ночных значений основных показателей ВСР после работы в открытом космосе у космонавта К2.

Этапы	Сутки полета	ЧСС	pNN50	SI	TP	HF	LF	VLF
До ВКД-1	32	47,1	13,3	102,4	1370	27,8	36,7	35,6
После ВКД-1	40	46	15,8	95,8	1650,2	20,9	50,4*	28,7*
До ВКД-2	102	46,1	12,9	97,6	1405,7	32,4	38,8	28,8
После ВКД-2	106	47,5	11,5	112	1460,4	27,6	41,2	31,2
До ВКД-3	129	47,9	10,7	95	2220,8	19,3	46,8	33,9
После ВКД-3	132	46,9	8,41	132,8*	942,8*	23,7	44,8	31,5

\* – изменения статистически достоверны ( $p < 0,05$ )

Табл. 6. Изменения средних ночных значений основных показателей ВСР после работы в открытом космосе у космонавта К3.

Показатели	За 12 дней до ВКД	Вторая ночь после ВКД
ЧСС, уд/мин	57,7	69,2*
pNN50, %	15,6	7,8*
SI, усл.ед	71,7	121,4*
TP, мс <sup>2</sup>	2356,3	1342,6*

\* – изменения статистически достоверны ( $p < 0,05$ )

Табл. 7. Результаты анализа данных, полученных с помощью прибора «Сонокард» до и после операции ВКД у космонавта К1.

Этапы	Сутки полета	ЧСС	pNN50	SI	TP	HF	LF	VLF
До ВКД-1	33	47,1	38,6	31,9	5090	22,5	52,4	25,1
После ВКД-1	39	54,2*	16,4*	64,7*	2932,6*	13,9*	63,5*	22,5
До ВКД-2	62	46,8	28,9	34,5	4973,8	18,4	49,6	32
После ВКД-2	64	52,8	12,9*	94,3*	1891*	19,3	53,4	27,3

\* – изменения статистически достоверны ( $p < 0,05$ )

за время своего 6-месячного полета совершил три выхода в открытый космос для выполнения работ на поверхности Международной космической станции. После первого выхода кроме значительного увеличения LF и снижения VLF результаты анализа ВСР не показали других существенных изменений по сравнению с контрольной записью за 9 дней до ВКД. После второго выхода сохранялось лишь умеренное увеличение LF и снижение VLF. Только после 3-го выхода появились отчетливые признаки

функционального напряжения в виде роста SI и снижения TP.

В табл. 7 показаны результаты исследований космонавта К1, который совершил один выход в открытый космос, состоявшийся на 153 сутки полета, т. е. в самом конце длительного полугодового полета, что возможно и повлияло на полученные данные. На вторую ночь после ВКД отмечалось отчетливое повышение функционального напряжения в виде достоверного роста ЧСС и SI и снижения pNN50 и TP.

Показано, что функциональное напряжение, обусловленное снижением функциональных резервов организма, возникает у всех космонавтов, но проявляется в разной степени в зависимости от индивидуальных особенностей. По-видимому, здесь имеет значение запас функциональных резервов, которые постепенно истощаются во время полета. Возможно, поэтому функциональное напряжение тем выше, чем больше срок пребывания в условиях невесомости.

## Заключение

Выполнение эксперимента «Сонокард» на борту МКС позволило получить важные научные и практические результаты. Прежде всего, следует указать на разработку уникальной методики бесконтактной регистрации физиологических сигналов во время сна в условиях длительного космического полета. Эта методика проста, комфортна и позволяет получать качественные записи в течение всей ночи. Созданная для реализации этой методики аппаратура «Сонокард» в течение 5 лет использовалась на борту МКС и показала свою надежность и безотказность. Программные средства, разработанные для анализа получаемых во время сна записей сейсмокардиограммы, позволили получить ценные научные данные об особенностях ночного сна космонавтов на разных этапах полета [19]. Важно отметить возможность оценки качества сна членов экипажа, что крайне важно для определения степени восстановления функциональных резервов организма и планирования режима труда и отдыха. Серия исследований во время сна после выполнения космонавтами работ в открытом космосе показала, что этот новый поход позволяет судить о степени напряжения организма и его восстановительной способности, а также об энергетических затратах на выполнение работы [20]. Впервые проведена систематическая регистрация физиологических сигналов во время сна в космосе и это является прецедентом для дальнейшего внедрения новой методики в практику медицинского обеспечения космических полетов.

По результатам выполнения эксперимента «Сонокард» разработаны конкретные рекомендации по направлению дальнейших исследований и по использованию полученных научных результатов. Рекомендуется дальнейшее развитие созданной новой методики применительно к медицинскому контролю за членами всего экипажа, в частности, для будущих межпланетных полетов. Важными областями дальнейшего применения методики бесконтактной регистрации физиологических сигналов во время сна являются клиническая и восстановительная медицина и прикладная физиология.

Опыт использования разработанной методики бесконтактной регистрации физиологических сигналов во время сна в эксперименте с длительной изоляцией (Марс-500) позволяет рекомендовать ее к применению в наземных экспери-

ментах по моделированию воздействия факторов космического полета на организм человека.

### Литература

1. Баевский Р. М., Поляков В. В., Мозер М. и др. Адаптация системы кровообращения к условиям длительной невесомости. Баллистокардиографические исследования в 14-месячном космическом полете. *Косм. биол. и авиакосм. мед.*, 1998, 3, с. 23–30.
2. Варонечас Г., Жемайтите Д. Особенности динамики ритмограмм во время различных стадий и фаз сна. // *Анализ сердечного ритма. / Под редакцией Д. Жемайтите, Л. Телькснис. Вильнюс: Мокслас.* 1982. – С. 52–74.
3. Воронин И. М., Бирюкова Е. В. Вариабельность сердечного ритма во время сна у здоровых людей. // *Вестник аритмологии.* – 2002. – №30. – С. 68–71.
4. Баевский Р. М., Фунтова И. И., Прилуцкий Д. А., Стругов О. М., Седецкий В. С., Черникова А. Г. Патент на полезную модель № 73772. «Система бесконтактной непрерывной регистрации частоты сердечных сокращений, частоты дыхания и двигательной активности космонавтов для круглосуточного съема сигналов» от 16.08.2007.
5. 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.
6. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // *Circulation.* – 1996. – Vol. 93. – P. 1043–1065.
7. Parin V. V., Baevsky R. M., Gazenko O. G. Heart and circulation under space conditions. *Cor et Vasa*, 1965, v.7, № 3, p. 165–182.
8. Парин В. В., Баевский Р. М., Газенко О. Г. Достижения и проблемы современной космической кардиологии // *Кардиология*, 1965, Т.5, №3. с. 3–11.
9. Парин В. В., Баевский Р. М., Волков Ю. Н., Газенко О. Г. *Космическая кардиология.* Л., Медицина, 1967, 193 с.
10. Баевский Р. М. Анализ вариабельности сердечного ритма в космической медицине. – *Физиология человека*, 2001, № 2, с. 34–43.
11. Баевский Р. М., Черникова А. Г., Фунтова И. И. Оценка функционального состояния и типа вегетативной регуляции системы кровообращения в условиях космического полета по данным анализа вариабельности сердечного ритма. – В сб.: *Диагностика и лечение нарушений регуляции сердечно-сосудистой системы.* М., 2005, с. 310–318.
12. Башмаков М. Ю., Вейн А. М., Посохов С. И., Баевский Р. М., Константинова Е. В., Черникова А. Г. Идентификация функциональных состояний человека во время ночного сна по показателям сердечного ритма. *Физиологический журнал им. И. М. Сеченова*, 1996, Май–Июнь, с. 43–47.
13. 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.
14. Черникова А. Г. Оценка функционального состояния организма в условиях длительного космического полета на основе анализа вариабельности сердечного ритма. Автореф. канд. дисс. М., 2010.
15. R. Baevsky, A. Chernikova, I. Funtova, J. Tank. Assessment of Individual Adaptation to Microgravity during long term space flight based on stepwise Discriminant Analysis of Heart Rate Variability Parameters. *Acta Astronautica*, 2011, AA-D-11-00046R1.
16. Луцицкая Е. С., Фунтова И. И., Катунцев В. П., Баевский Р. М. Оценка резервных возможностей организма космонавтов при выполнении работ в открытом космосе. *Материалы седьмой международной научной конференции «Донозология-2011», Санкт-Петербург, 15–16 декабря 2011 г.*, с. 668–670.
17. Баевский Р. М., Фунтова И. И., Луцицкая Е. С., Слепченкова И. Н., Катунцев В. П., Осипов Ю. Ю. Исследования вариабельности сердечного ритма во время сна на борту международной космической станции. *Вестник Удмуртского государственного университета*, 2012, серия 6, выпуск 1, с. 30–37.
18. Funtova I., Baevsky R., Luchitskaya E., Slepchenkova I. The flight experiment «Sonocard» on board the International Space Station (ISS) — the contactless study of autonomic cardiovascular regulation during sleep in long term space flight. 19th IAA Humans in Space Symposium, 2013, ID: 55.
19. Слепченкова И. Н. Оценка функционального состояния организма при действии факторов космического полета по данным бесконтактной регистрации физиологических сигналов в ночной период суток. Автореферат канд. дисс. М., 2010, 24 с.
20. Baevsky R., Funtova I., Luchitskaya E., Slepchenkova I., Chernikova A., Osipov Y., Katuntsev V. Application of equipment Sonocard for functional reserves evaluation during extravehicular activity. 62nd International Astronautical Congress 2011, ID: 10605.

## The research of functional conditions in humans during night sleep during prolonged exposure to microgravity. Space experiment «Sonocard»

I. I. Funtova, E. S. Luchitskaya  
 I. N. Slepchenkova, A. G. Chernikova  
 R. M. Baevsky

Institute of biomedical problems of the  
 Russian Academy of Sciences, Moscow

### Abstract

The purpose of the space experiment «Sonocard» was to develop proposals to improve the system of medical control for the cosmonauts on the basis contactless method for receiving physiological data during sleep. Space experiment «Sonocard» was conducted in 22 Russian cosmonauts in the course of 17 expeditions on the ISS during 2007–2012. It was conducted in total 302 investigations, including the preflight period — 47, during flight — 215 and during post-flight period — 40. In the course of the experiment «Sonocard» execution, the microvibrations of the cosmonauts body associated with heart rate, respiration and physical activity, were recorded by seismocardiographical method. The most important feature of conducted space experiment was a contactless method of recording the physiological functions, thus ensuring simplicity, comfort and physiologicality of research. Onboard device «Sonocard» is the original domestic developing and it was designed as a compact unit, which was located in a breast pocket of T-shirts. A central place at the data analysis belonged to the heart rate variability (HRV) analysis — a method to reveal the stress level and the autonomic regulation of the circulatory system. Indicators of the sympathetic and parasympathetic parts of autonomic nervous system, the status of the vascular center in medulla oblongata, the activity of higher autonomic centers were calculated at HRV analysis.

Information about functional status of the various links of autonomic regulation during the night period in microgravity were received for the first using the method of contactless registration of physiological signals at different stages of space flight. A systematic study of the functional conditions during night period in the crew members of the International Space Station has been first conducted. It is shown that in the absence of in-flight workload and psycho-emotional stress is a gradual increase in the activity of the central mechanisms of regulation of blood circulation. Typical decrease in the expressiveness of respiratory waves (HF) and increased activity of vascular center (LF) in the total HRV spectrum is marked in most cosmonauts to the end of flight.

The assessment of sleep quality under conditions of long-duration space flight has shown that sleep in flight and post-flight periods was better than before the

flight in most cosmonauts. The data on the sleep quality after the work of cosmonauts in space were obtained for the first. It is shown that these activities require a high tension of regulatory systems and lead to a significant spending of functional reserves.

The findings have both scientific and practical importance. The developed technique of evaluating the functional status and the degree of functional reserves recovery during sleep, based on contactless registration of physiological signals, is recommended for use in the practice of medical support of space missions, application in ground-based experiments, as well as for use in clinical practice and in rehabilitation medicine.

**Key words:** contactless registration of the physiological information, body microfluctuations, seismocardiography, autonomic regulation, heart rate variability, night sleep, quality of sleep, tension degree, restoration of the functional reserves.

## Дослідження функціонального стану організму під час сну в умовах тривалої невагомості. Космічний експеримент «Сонокард»

I. I. Фунтова, Є. С. Лучицька  
 I. Н. Слєпченкова, А. Г. Чернікова  
 Р. М. Баєвський

Інститут медико-біологічних проблем  
 РАН, Москва

### Резюме

Метою космічного експерименту «Сонокард» була розробка пропозицій щодо вдосконалення системи медичного контролю за космонавтами на основі використання методу безконтактного знімання фізіологічної інформації в період сну. Космічний експеримент «Сонокард» протягом 2007-2012 рр. був проведений у 22 Російських космонавтів у 17 експедиціях на МКС. У процесі виконання експерименту «Сонокард» методом сейсмокардіографії реєструвалися мікроколивання тіла космонавта, пов'язані з серцевими скороченнями, диханням і руховою активністю. Найважливішою особливістю космічного експерименту, що проводився є використання безконтактної методики реєстрації фізіологічних функцій, що забезпечувало простоту, комфортність і фізіологічність досліджень. Бортовий прилад «Сонокард» виконаний у вигляді компактного пристрою, який розміщується у нагрудній кишені майки-футболки. Центральне місце при аналізі даних займав аналіз варіабельності серцевого ритму (BCP), що дозволяє судити про рівень стресу, про вегетативну регуляцію системи кровообігу. Вперше в умовах тривалого космічного польоту отримано дані про стан різних ланок системи вегетативної

регуляції в нічний період доби на різних етапах польоту.

**Ключові слова:** безконтактний зйом фізіологічної інформації, мікроколивання тіла, сейсмокардіографія, вегетативна регуляція, варіабельність серцевого ритму, сон, якість сну, ступінь напруги, відновлення функціональних резервів.

### 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