

Физиологические исследования

УДК 613.614+613.693

Р.М. Баевский, И.И. Фунтова, Е.С. Лучицкая, И.Н. Слепченкова, В.П. Катунцев, Ю.Ю. Осипов

ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ВО ВРЕМЯ СНА НА БОРТУ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Для исследования вариабельности сердечного ритма во время сна на борту Международной космической станции использовался миниатюрный прибор «Сонокард», который обеспечивает бесконтактную регистрацию пульсовых колебаний грудной стенки (сейсмокардиограмму). Данные оперативно передаются на Землю, и с помощью специального программного обеспечения формируются динамические ряды кардиоинтервалов. Исследования всех российских членов экипажей Международной космической станции проводятся с 2007 г. каждые две недели, а также до и после полета. В ходе 13 полугодовых экспедиций количество ночных записей составило 236, из них 169 в условиях длительной невесомости. Впервые получены объективные оценки качества сна космонавтов. Анализ разностных значений показателей вегетативной регуляции в начале и в конце периода сна позволяет дать прямой ответ на вопрос об эффективности ночного сна как средства восстановления работоспособности космонавта. Новая методология использовалась для оценки состояния вегетативной регуляции и функциональных резервов организма у членов экипажей, выполняющих работу в открытом космосе.

Ключевые слова: вариабельность сердечного ритма, бесконтактная регистрация, качество сна, вегетативная регуляция, работа в открытом космосе.

Успех профессиональной деятельности, наряду с другими факторами, зависит от функционального состояния человека, которое не может быть признано надежным без полноценного отдыха и сна. Несмотря на многолетний опыт и большое количество исследований, специалисты не располагают достаточным количеством экспериментальных данных о характере и деталях изменений сна, вызываемых комплексным воздействием факторов космического полета. Исследования ночного сна в условиях космического полета, проведенные в коротких и длительных экспедициях, выявили сдвиги в структуре сна, касающиеся функционально значимых параметров, наряду с сохранением всех фаз и стадий сна и его циклической организации.

В 1990-е гг. на борту орбитальной станции «Мир» были проведены первые исследования сна с использованием метода баллистокардиографии, который позволяет бесконтактно, путем регистрации пульсовых микроперемещений тела изучать сердечную деятельность и дыхание [1; 2]. Эти научные эксперименты «Сон» и «Ночь» были в основном направлены на изучение вегетативной регуляции функций в условиях длительного космического полета. И хотя были получены важные научные данные об изменении вегетативного статуса и сократительной функции сердца на разных этапах длительного действия невесомости, до настоящего времени нет общепринятого мнения о качестве сна космонавтов в полете.

В октябре 2007 г. на Международной космической станции (МКС) был проведен первый научный эксперимент «Сонокард», где регистрировалась не баллистокардиограмма (пульсовые колебания всего тела), а сейсмокардиограмма – локальные колебания грудной стенки, связанные с сердечными сокращениями. Для этого был создан миниатюрный прибор, комфортный, простой и удобный в эксплуатации. Это позволило проводить исследования регулярно у всех российских членов экипажей МКС.

Материалы и методика исследований

За 4 года (с октября 2007 г.) научный эксперимент «Сонокард» был выполнен 16 космонавтами в ходе 13 полугодовых экспедиций (МКС-16 – МКС-28). Исследования проводились три раза до полета (-90, -60, -30 суток), каждые 14 дней во время полета и дважды в послеполетном периоде (на 1–2-е и 3–4-е сутки после полета). Общее число ночных записей составило 236, из них 169 в условиях длительного космического полета.

Аппаратно-программный комплекс «Сонокард» является бортовым прибором, используемым для проведения научного эксперимента «Сонокард» на борту Международной космической станции.

«Сонокард» является оригинальной отечественной разработкой, на которую оформлен патент №1845876 (Р.М. Баевский, И.И. Фунтова, А.Г. Черникова, Д.А. Прилуцкий, В.С. Седлецкий, О.М. Стругов, 2008). 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. Прибор размещается слева в верхнем кармашке футболки космонавта, и его датчик воспринимает микроколебания грудной стенки, связанные с работой сердца. Одновременно воспринимаются и все другие колебания, обусловленные двигательной активностью человека или внешними воздействиями. 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.

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



Установка прибора «Сонокард» перед сном во время космического полета

Записи сигналов, получаемых с помощью прибора «Сонокард», представляют собой результат регистрации всех вибраций, воспринимаемых датчиком – акселерометром. При расположении на грудной стенке в области грудины датчик регистрирует сейсмокардиограмму – колебания грудной стенки, связанные с сердечными сокращениями (рис. 1). Наряду с этим, регистрируются разнообразные эндо- и экзогенные колебания. К эндогенным можно отнести произвольную и непроизвольную двигательную активность человека, его дыхание, мышечный тремор, перистальтику кишечника и др. На борту Международной космической станции к числу экзогенных источников колебаний относятся многочисленные моторы, насосы, вентиляторы и т.п. Таким образом, выделение полезного сигнала из исходных записей, получаемых с помощью упомянутых приборов, занимает важное место в методическом обеспечении исследований.

Центральное место при оценке результатов бесконтактной регистрации физиологических сигналов занимает анализ variability сердечного ритма (ВСР). Этот метод успешно используется в различных областях медицины и физиологии для оценки состояния вегетативной регуляции функций. В настоящем исследовании впервые проводился систематический анализ ВСР в ночной период суток на разных этапах длительного космического полета. Для оценки степени восстановления функциональных резервов организма (качества сна) определялись разностные значения показателей ВСР в первый и последний часы сна. На основании сравнения результатов анализа ВСР с данными полисомнографии были установлены наиболее информативные для решения этой задачи показатели ВСР: pNN50, SDNN, SI, TP [3].

Создана уникальная программа «Сог», которая обеспечивает цифровую фильтрацию сигналов, затем распознавание отдельных комплексов и измерение временных интервалов между ними. На рис. 2 представлены данные сравнения показателей временного ряда (средних значений и дисперсии) при сравнении результатов анализа сейсмокардиограммы и электрокардиограммы. Программа обработки выделяет для анализа ВСР 5-минутные участки записи и в каждом из них вычисляет стандартные временные и частотные показатели. Анализ и физиологическая интерпретация показателей ВСР проводилась в соответствии с рекомендациями группы российских экспертов [4] и по стандартам Европейского общества кардиологов и Северо-Американского общества электростимуляции и электрофизиологии [5].

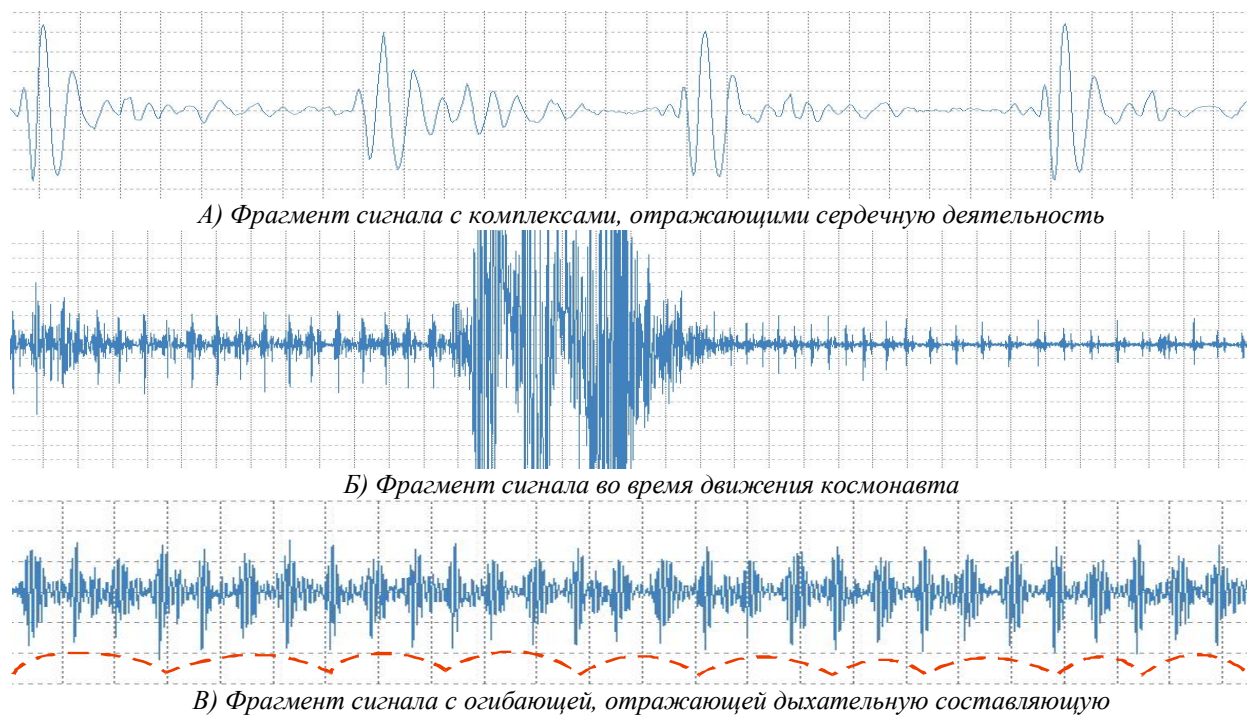


Рис. 1. Фрагменты сигналов, отражающие различные физиологические процессы

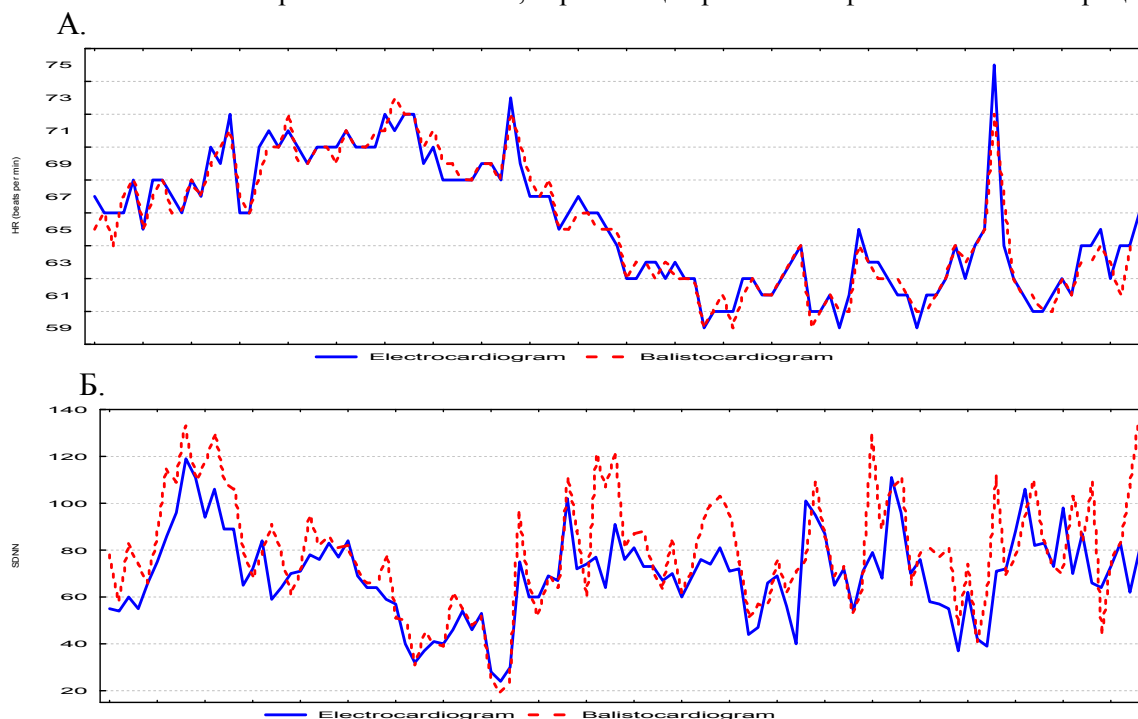


Рис. 2. Сопоставление данных ЧСС (А) и SDNN (Б) по результатам обработки контактной (ЭКГ) и бесконтактной (БКГ) записей

Анализ ВСР проводится в пятиминутных участках записи, свободных от двигательной активности и артефактов. Программой предусмотрена возможность усреднения значений в 5-минутных участках за заданный интервал времени, в том числе вычисление средних значений показателей за всю ночь (средненочные значения) и за каждый час сна в отдельности.

Результаты исследований

На рис. 3 представлены результаты усреднения полученных у космонавтов средненочных значений ряда основных показателей функционального состояния частоты сердечных сокращений (ЧСС), частоты дыхания (ЧД), активности симпатического (SI – стресс-индекс) и парасимпатического (рNN50) звеньев системы вегетативной регуляции. При обсуждении этих данных впервые можно говорить об изменениях, на которых непосредственно не отражаются факторы рабочей нагрузки и психоэмоционального напряжения, которые всегда присутствуют при выполнении научных экспериментов в рамках штатной программы полета.

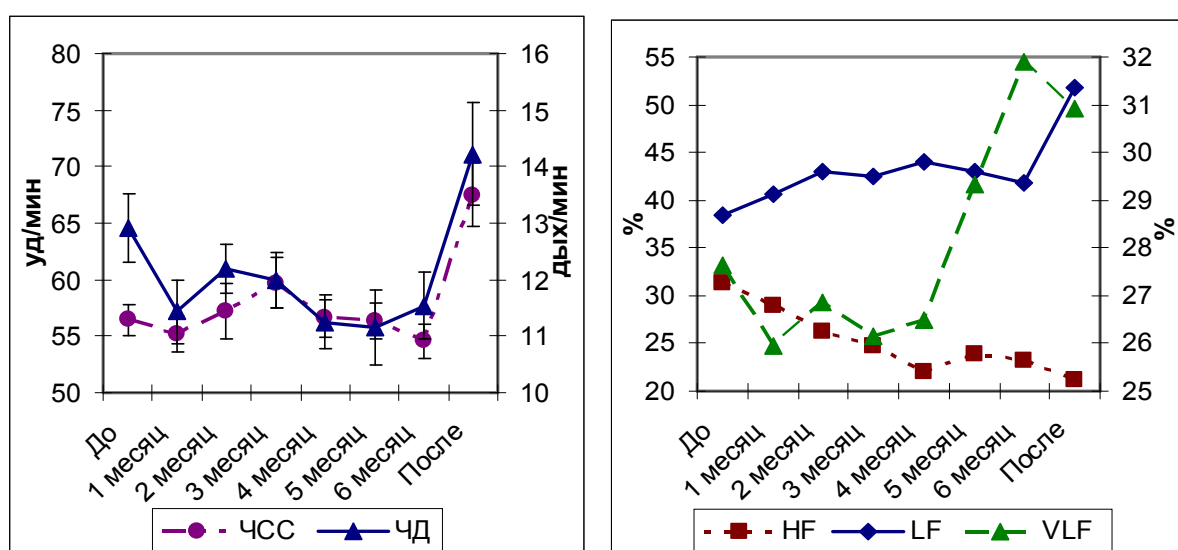


Рис. 3. Динамика средних ночных значений частоты пульса (ЧСС), частоты дыхания (ЧД) и показателей спектрального анализа ВСР – HF, LF и VLF во время полетов на Международной космической станции

Естественно, на эти данные существенно влияют индивидуальные особенности вегетативной регуляции и психологического статуса космонавтов. Вместе с тем имеются и некоторые общие закономерности динамики. Достоверным является снижение частоты дыхания во время длительного 6-месячного пребывания в условиях невесомости. Большого внимания заслуживает противофазная динамика показателей HF и LF в ходе длительного космического полета. Она отражает постепенное смещение вегетативного баланса в сторону увеличения активности симпатического звена регуляции, в частности растет активность подкоркового центра регуляции сосудистого тонуса. На 5–6-м месяцах полета в процесс адаптации включаются надсегментарные уровни регуляторного механизма, ответственные за энергометаболические процессы. На рис. 4 представлена динамика HF у трех членов экипажей МКС в ходе длительного полета. Здесь наглядно проявляется индивидуальный тип адаптации к условиям невесомости. Характерное снижение величины HF к концу полета отмечается у большинства космонавтов, но степень этого снижения различна.

Качество сна и эффективность процессов восстановления функциональных резервов могут быть оценены путем сопоставления данных первого и последнего часа сна. Как показали исследования по сопоставлению показателей ВСР с результатами полисомнографии, наиболее высокой является корреляция индекса сна с разностными значениями SDNN, RMSSD, SI, рNN50 и TP. Весьма наглядными являются графики изменений ЧСС и рNN50. Во время сна величина ЧСС снижается и утреннее значение оказывается меньше вечернего. Показатель рNN50, наоборот, растет в связи с увеличением активности парасимпатического звена регуляции.

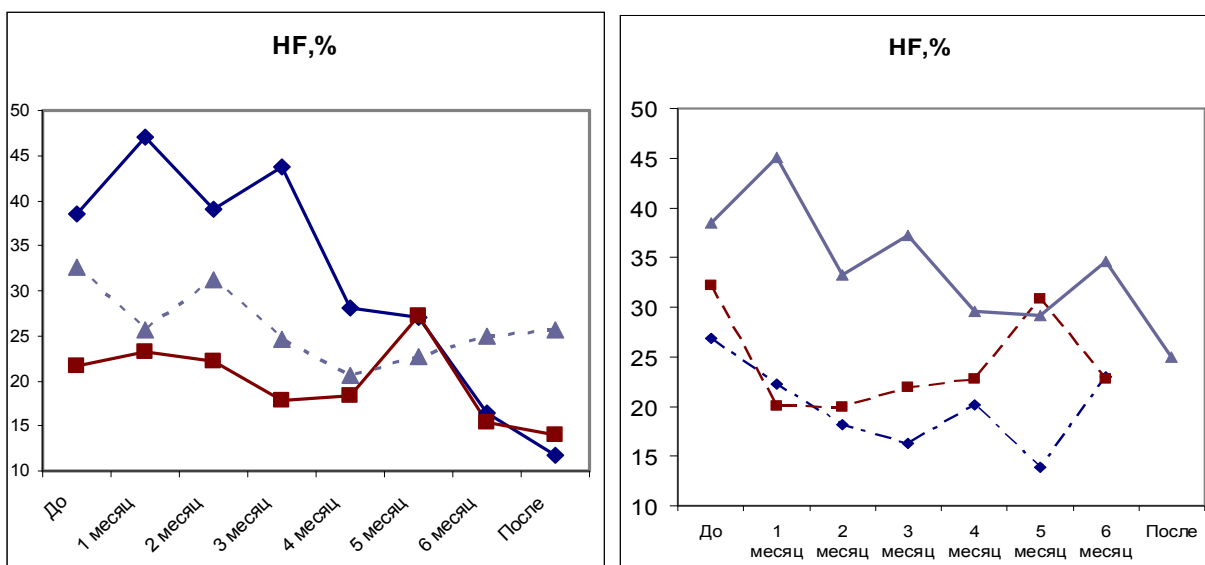


Рис. 4. Динамика показателя HF (%) у трех членов экипажей МКС во время длительного космического полета

На рис. 5 в качестве примера представлены графики разностных значений для двух членов экипажа МКС-17, что позволяет сравнить качество сна в одном полете. Видно, что противофазный характер изменений выбранных двух показателей позволяет получить наглядную картину наличия и степени нарушения их нормальных взаимоотношений. Качество сна за весь полет можно оценить по соотношению числа ночей с нормальными соотношениями динамики ЧСС и pNN50 в % к общему числу проведенных в полете исследований. Так, для представленных данных качество сна у МКС-17-А равно 66,6% (8/12), а у МКС-17-Б равно 91,6% (11/12).

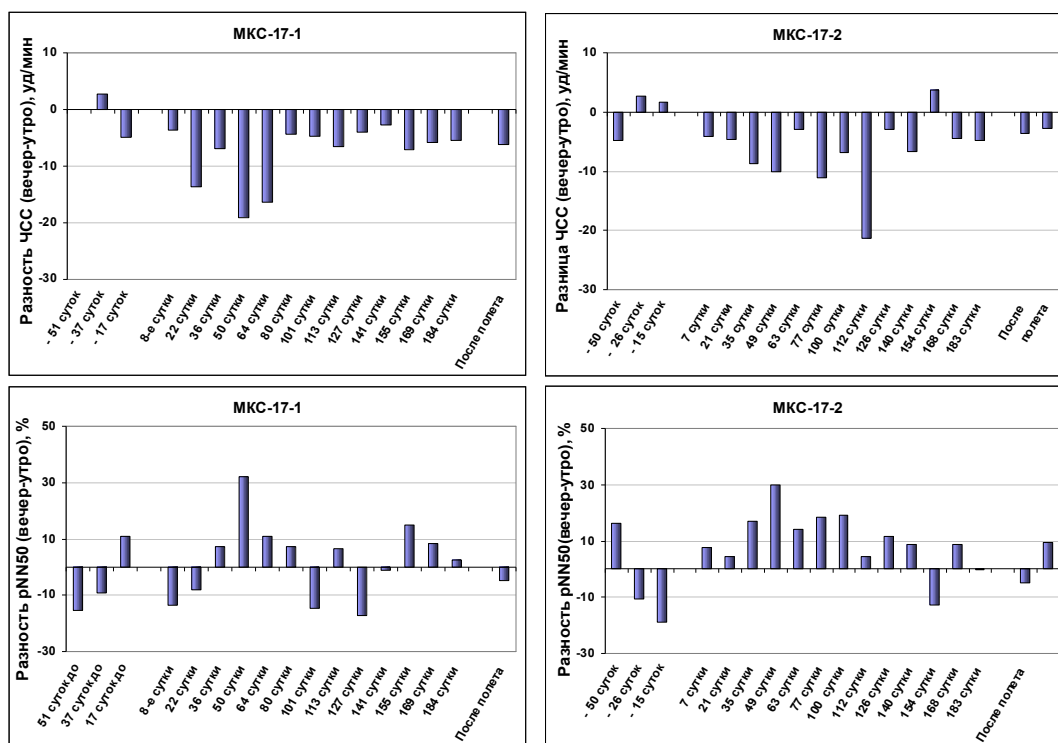


Рис. 5. Оценка качества сна по разностным значениям показателей ЧСС и pNN50 у двух членов экипажа МКС-17

При анализе качества сна у членов экипажей МКС по разностным значениям показателей ВСР обнаружилось, что сон в условиях длительной невесомости не всегда обеспечивает достаточное восстановление функциональных резервов организма. Так, из исследованных нами членов экипажей более чем у половины среднеполетное качество сна было в пределах 50-80%, у многих оно было выше 80% и лишь у некоторых – ниже 50%.

Как известно, сон играет ведущую роль в восстановлении функциональных резервов организма. Поэтому важное 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 выполнение внекорабельной деятельности (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».

Первичное исследование перед работой в открытом космосе проводилось за 5-10 дней до операции ВКД. Повторное исследование проводилось в первую ночь после работы в открытом космосе. Исследования проведены во время шести выходов в открытый космос трех российских космонавтов. Один из космонавтов участвовал в трех операциях ВКД, второй – в двух операциях, третий – только в одной. В табл. 1 и 2 представлены средние ночные значения основных показателей ВСР при выполнении операций ВКД космонавтами К1 и К2. У космонавта К1 за 6 дней до выполнения работ в открытом космосе (33-й день полета) отмечалась умеренная брадикардия (средняя ночная частота пульса 47,1 уд/мин) и несколько повышенное значение 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 снижение величин pNN50, TP и HF, а также рост SI (стресс индекса).

Таблица 1

Изменения средних ночных значений основных показателей ВСР после работы в открытом космосе у космонавта К1

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

Таблица 2

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

* Изменения статистически достоверны ($p < 0,05$).

В табл. 2 представлены аналогичные данные космонавта К2, который 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 третьего выхода появились отчетливые признаки функционального напряжения в виде роста SI и снижения TP.

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. Таким образом, после второго выхода в открытый космос наблюдалось более значительное напряжение регуляторных систем, чем после первого выхода.

В табл. 3 показаны результаты исследований космонавта КЗ, который совершил один выход в открытый космос, состоявшийся на 153-и сутки полета, то есть 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 рNN50 и TP.

Таблица 3

**Результаты анализа данных, полученных с помощью прибора «Сонокард»
до и после операции ВКД у космонавта КЗ**

Показатели	За 12 дней до ВКД	Вторая ночь после ВКД
ЧСС, уд/мин	57,7	69,2*
рNN50, %	15,6	7,8*
SI, усл.ед	71,7	121,4*
TP, мс ²	2356,3	1342,6*

* Изменения статистически достоверны ($p < 0,05$).

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

Впервые проведены систематические исследования функционального состояния организма во время сна в условиях длительной невесомости и получены объективные оценки качества сна космонавтов. Анализ разностных значений показателей вегетативной регуляции в начале и в конце периода сна позволяет дать прямой ответ на вопрос об эффективности ночного сна как средства восстановления работоспособности космонавта на разных этапах космического полета. Созданная и апробированная в ходе выполнения на МКС космического эксперимента «Сонокард» методология бесконтактной регистрации физиологических сигналов в ночной период суток может быть использована для совершенствования системы медицинского контроля за состоянием здоровья космонавтов в длительных полетах, для контроля за состоянием вегетативной регуляции кровообращения и функциональными резервами организма у членов экипажей, выполняющих работу в открытом космосе, и оптимизации планирования операций ВКД, а также для применения в наземных экспериментах с моделированием воздействия на организм факторов космического полета, в клинической, спортивной и восстановительной медицине и в прикладной физиологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baevsky R.M., Moser M., Nikulina G.A. et al. Autonomic regulation of circulation and cardiac contractility during a 14-month space flight // *Acta Astronaut.* 1998. Vol. 42 (1-8). P. 159-73.
2. Баевский Р.М., Поляков В.В., Мозер М. и др. Адаптация системы кровообращения к условиям невесомости. Баллистокardiографические исследования в 14-месячном космическом полете // *Авиакосмическая и экологическая медицина.* 1998. №3. С. 23-30.

3. Баевский Р.М., Богомолов В.В., Фунтова И.И., Слепченкова И.Н., Черникова А.Г. Перспективы развития системы медицинского контроля в длительном космическом полёте на основе бесконтактной регистрации физиологических функций во время сна // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2009. №3. С.34-40
4. Баевский Р.М., Иванов Г.Г., Чирейкин Л.В. и др. Анализ вариабельности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (методические рекомендации) // Вестн. аритмологии. 2001. № 24. С. 69-85.
5. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // Circulation. 1996. Vol. 93. P. 1043-1065.

Поступила в редакцию 03.02.12

R.M. Baevsky, I.I. Funtova, E.S. Luchitskaja, I.N. Slepchenkova, V.P. Katuntsev, Yu.Yu. Osipov
Researches of heart rate variability during the sleep onboard the international space station

To study the heart rate variability during sleep onboard the International space station the device "Sonocard" which provides contactless registration of pulse fluctuations of a chest wall (seismocardiogram) has been used. Data are operatively transmitted to the Earth and by means of a special software the time series of cardiointervals are formed. Researches of all Russian crew members of the International space station are spent since 2007 each two weeks, and also before and after flight. During 13 semi-annual expeditions, there have been made 236 night records and 169 of them in the conditions of long weightlessness. The objective estimations for the quality of cosmonauts' sleep have been received for the first time. The analysis of differences between vegetative regulation parameters in the beginning and in the end of the sleep period allows to give a direct answer to the question on efficiency of a night sleep as means of the restoration of a working capacity of a cosmonaut. The new methodology has been used for the estimation of the condition of vegetative regulation and functional reserves of an organism at members of the crews performing work in a free space.

Keywords: heart rate variability, contactless registration, quality of a sleep, vegetative regulation, work in a free space.

Баевский Роман Маркович, профессор,
доктор медицинских наук, главный научный сотрудник
E-mail: rmb1928@mail.ru

Baevsky R.M., professor, doctor of medical sciences,
main scientific researcher
E-mail: rmb1928@mail.ru

Фунтова Ирина Исаевна, кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник
E-mail: funtova.imbp@mail.ru

Funtova I.I.,
candidate of biological science, senior researcher
E-mail: funtova.imbp@mail.ru

Лучицкая Елена Сергеевна,
кандидат биологических наук, научный сотрудник
E-mail: e.luchitskaya@gmail.com

Luchitskaja E.S.,
candidate of biological science, scientific employee
E-mail: e.luchitskaya@gmail.com

Слепченкова Ирина Николаевна,
кандидат биологических наук, научный сотрудник
E-mail: bag22ira@yandex.ru

Slepchenkova I.N.,
candidate of biological science, the scientific employee
E-mail: bag22ira@yandex.ru

Катунцев Владимир Петрович, профессор,
доктор медицинских наук, заведующий отделом
E-mail: vpkat@yandex.ru

Katuntsev V.P., the professor,
doctor of medical sciences, head of department
E-mail: vpkat@yandex.ru

Осипов Юрий Юрьевич,
кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией
E-mail: osipov@imbp.ru

Osipov Yu.Yu.,
candidate of medical sciences, head of laboratory
E-mail: osipov@imbp.ru

ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН
123007, Россия, г. Москва, Хорошевское шоссе, 76-А

SSC RF – Institute for bio-medical problems RAS
123007, Russia, Moscow, Horoshevskoe shosse, 76-A