

УДК 612.084

**ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ
ПАРАМЕТРОВ СЕРДЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ
КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «КАРДИОВЕКТОР»**

Е.С. Лучицкая, И.И. Фунтова, К.С. Киреев

Е.С. Лучицкая; И.И. Фунтова (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)
канд. мед. наук К.С. Киреев (ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

Статья посвящена изучению вопросов адаптации сердечно-сосудистой системы и ее регуляторных механизмов к условиям и факторам длительного космического полета. Используются неинвазивные методики, позволяющие космонавтам проводить эксперимент самостоятельно на борту МКС. Показано что процесс адаптации носит индивидуальный характер, а сердце в условиях невесомости работает в более экономичном режиме. При использовании скорости распространения пульсовой волны в качестве сосудистого биомаркера не установлен повышенный риск возникновения сердечно-сосудистой патологии у космонавтов, совершивших полугодовые космические полеты.

Ключевые слова: космический эксперимент, сердечно-сосудистая система, анализ вариабельности сердечного ритма, баллистокardiография, раннее сосудистое старение

**Possibilities for Assessing Cardiac Parameters Using the Results
of the “Cardiovector” Space Experiment. E.S. Luchitskaya,
I.I. Funtova, K.S. Kireev**

The paper covers the issues of adaptation of the cardiovascular system and its regulatory mechanisms to the factors of a long-duration space flight using noninvasive methods that allow cosmonauts to conduct space experiments without assistance. It is shown that this adaptation process has an individual nature while the heart works more economically under the weightlessness conditions. Using the pulse wave velocity parameter as a biomarker it has been established that there is no increased risk of cardiovascular pathology in cosmonauts after a six-month space mission.

Keywords: space experiment, cardio-vascular system, analysis of heart rate variability, ballistocardiography, early vascular ageing

Медико-биологическое обеспечение полноценной жизнедеятельности и безопасности экипажей космических миссий является приоритетной задачей пилотируемой космонавтики на всех этапах ее развития. В связи с предстоящими задачами по дальнейшему освоению не только низкой околоземной орбиты, но и планируемыми работами на лунных базах или на поверхности других небесных тел, наиболее актуально встают вопросы, касающиеся

поиска алгоритмов оценки, прогнозирования и предотвращения возможных рисков возникновения патологических состояний.

В последнее время происходит смещение фокуса медико-биологических исследований на борту Международной космической станции с изучения адаптации к условиям космического полета к решению проблем снижения и контроля медицинских рисков во время нахождения в невесомости, при возвращении на Землю, а в будущем – при осуществлении профессиональной деятельности на поверхности Луны.

Именно в космической кардиологии было предложено рассматривать сердечно-сосудистую систему в качестве индикатора адаптационных реакций целостного организма, а в последние годы была выдвинута концепция адаптационных рисков и их оценки для прогнозирования возможного ухудшения состояния здоровья и функционирования отдельных систем и органов космонавтов [1, 2].

Космический эксперимент «Кардиовектор» является логическим продолжением научных экспериментов «Пульс» и «Пневмокард», проводившихся на борту МКС с 2002 года с целью изучения механизмов адаптации сердечно-сосудистой системы к длительному воздействию на организм человека факторов космического полета. С 2014 года он включен в Программу долговременных научных исследований и на данный момент (реализуется 3-й этап) он проведен с участием 20 космонавтов в течение 15 длительных экспедиций.

Все космонавты подписывали добровольное информированное согласие на участие в исследованиях, одобренных комиссией по биоэтике ГНЦ РФ–ИМБП РАН и многосторонним экспертным советом по исследованиям на человеке.

Сеанс КЭ «Кардиовектор» проводится у российских космонавтов на борту МКС ежемесячно, а также дважды – в предполетный период и после приземления. В ходе эксперимента производится запись электрокардиограммы, импедансной кардиограммы, баллистокардиограммы, сейсмокардиограммы и пневмотахограммы (рис. 1), что позволяет регистрировать и анализировать изменения основных параметров центральной и периферической гемодинамики, вариабельность сердечного ритма (ВСР), энергетические характеристики работы сердца в покое и при различных нагрузочных тестах.

Вся информация, которая может быть получена в рамках проводимого эксперимента, анализируется индивидуально, для объяснения адаптационных процессов данного конкретного космонавта, а также входит в имеющиеся объемы статистических данных, для определения общей направленности процессов адаптации по всем космонавтам, участвующим в данном исследовании.

Изучение процессов адаптации организма к условиям окружающей среды, в том числе к условиям космического полета, невозможно без использования максимально обобщенных критериев оценки системных реакций организма на изменение средовых факторов. При анализе ВСР – основного



Рис. 1. Образец записи физиологических сигналов с использованием бортового прибора «Кардиовектор»

(сверху вниз: ЭКГ – электрокардиограмма; ИКГ – импедансная кардиограмма; dICG – первая производная импедансной кардиограммы; Z0 – базовый импеданс; BCGx, BCGy, BCGz – баллистокардиограмма по трем линейным осям; SCG – сейсмокардиограмма; ROTx, ROTy, ROTz – пространственная баллистокардиограмма по трем осям вращения; PTG – пневмотахограмма)

метода оценки функциональных резервов космонавтов, применяемого с самых первых пилотируемых полетов не только в нашей стране [3, 4], но и за рубежом, используются как традиционные подходы математического и спектрального анализа, так и разработанный учеными ГИЦ РФ–ИМБП РАН вероятностный подход с возможностью количественной оценки риска развития донозологических состояний [1, 2].

При анализе всего массива данных можно говорить о характерном снижении частоты сердечных сокращений (ЧСС) во время полета, снижении индекса централизации, увеличении общей вариабельности (показатель SDNN). Наиболее значимые изменения регуляторных механизмов регистрируются в начальном периоде реадаптации к земным условиям (рис. 2). У космонавтов снижены функциональные резервы, что выражается в достоверно низких показателях pNN50 (выраженность парасимпатической активности), и увеличен стресс-индекс, характеризующий симпатические влияния. Использование математической модели функциональных состояний позволяет оценивать динамику снижения функциональных резервов и увеличение степени напряжения регуляторных механизмов у каждого конкретного космонавта на разных стадиях длительного космического полета.

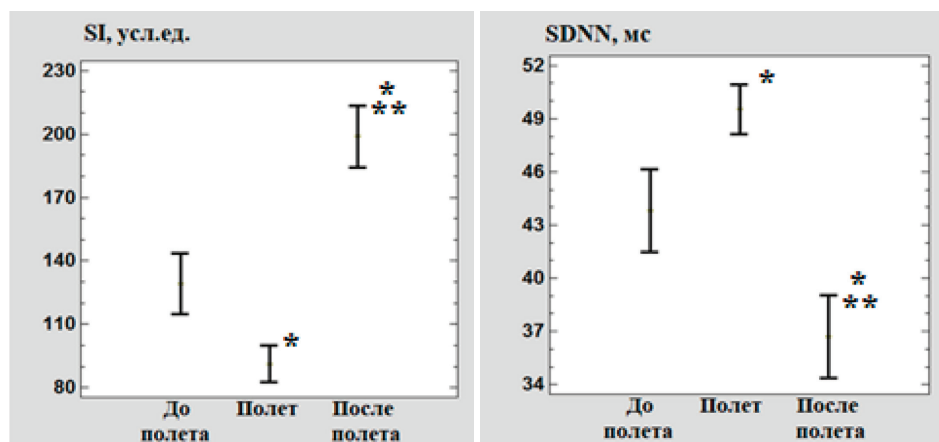


Рис. 2. Пример изменения параметров симпатической и парасимпатической регуляции до, во время и после длительного космического полета.

Примечание: достоверные различия ($p < 0,05$) по сравнению * – с фоном, ** – с полетом

Статистический анализ полученных экспериментальных данных проведен с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) с post-hoc критерием Тьюки для множественных сравнений (модуль ANOVA пакета STATISTICA V.12.0).

В дополнение к основному оборудованию 2-й этап эксперимента предусматривал разработку и поставку дополнительного оборудования – монитора артериального давления, отличительной особенностью которого является возможность оценки артериальной упругости с помощью расчетных методов анализа пульсовой волны.

В настоящее время показателем ригидности артериальной стенки и признанным стандартом исследования жесткости сосудистой стенки считается определение скорости распространения пульсовой волны. В ряде исследований показано, что скорость пульсовой волны может являться достоверным, объективным методом оценки жесткости артерий и одним из независимых предикторов риска развития сердечно-сосудистых патологий [5, 6]. Этот показатель наряду с растяжимостью сосудистой стенки коррелирует с наличием артериальной гипертензии [7] и ишемической болезни сердца (по данным Роттердамского исследования в 2014 году).

При анализе изменений, происходящих в течение 6-месячного космического полета, выявлено, что скорость распространения пульсовой волны, как индикатор раннего сосудистого старения, существенно не меняется по сравнению с предполетным уровнем (рис. 3). Это свидетельствует об отсутствии данных, говорящих в пользу увеличения жесткости сосудистой стенки в условиях микрогравитации.

Отсутствие гравитации и связи с опорой на МКС – идеальная среда для изучения микроколебаний тела, связанных с перемещением масс крови из

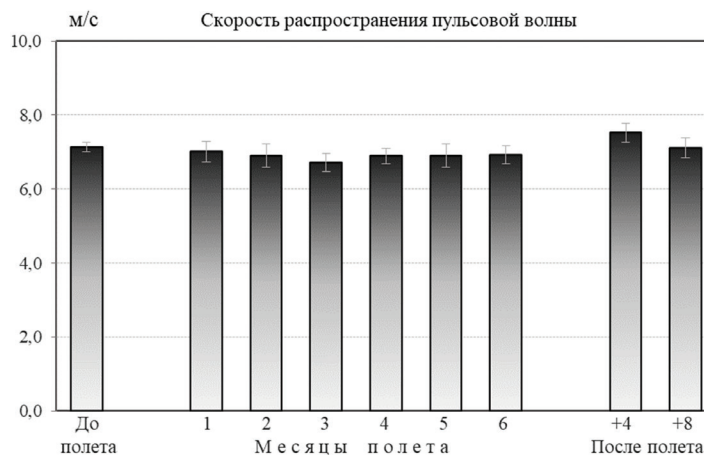


Рис. 3. Динамика изменений скорости распространения пульсовой волны до, во время и после длительных космических полетов

сердца в крупные сосуды [8, 9]. Эксперимент «Кардиовектор» предусматривает возможность анализа трехплоскостной баллистокардиограммы и основанного на ее анализе автоматического расчета и графического отображения модуля силы и кинетической энергии сердечного сокращения (рис. 4а). В результате обработки полученных данных обнаружено значимое снижение кинетической энергии в космическом полете и в то же время неизменное, сравнимое с предполетными данными, значение средней баллистической силы сердечного сокращения (рис. 4б). Этот факт подтверждает ранее сделанный вывод о более экономичной работе сердца в условиях невесомости.

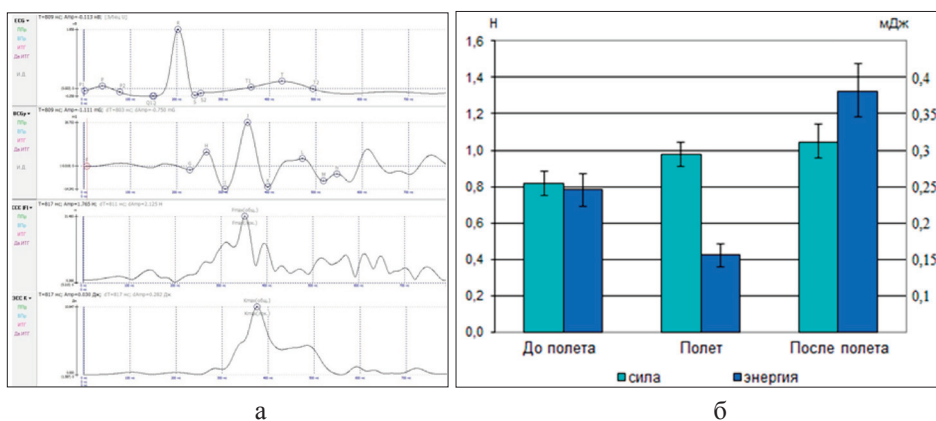


Рис. 4. Графическое отображение модуля силы и кинетической энергии сердечного сокращения:

а – возможности программной обработки и графическое отображение величины силы и энергии сердечного сокращения; *б* – динамика средних значений силы (Н) и энергии (мДж) сердечных сокращений до, во время и после длительного космического полета

Результаты космического эксперимента «Кардиовектор» подтверждают мнение многих специалистов о том, что 5–6 месяцев являются оптимальным сроком пребывания человека в условиях невесомости. В течение этого времени хорошо поддерживается внутрисистемный и межсистемный гомеостаз основных физиологических систем организма, благодаря разработанным профилактическим мерам. При увеличении длительности или изменении условий существования (выхода за пределы низкой околоземной орбиты) может наступить нестабильность функционального состояния, обусловленная тем, что в организме начинается поиск уровня гомеостаза, адекватного новым условиям окружающей среды.

Таким образом, 3-й этап эксперимента «Кардиовектор», реализуемый в настоящее время, предусматривает решение ряда задач, связанных не только с изучением роли вегетативной регуляции кровообращения в обеспечении адекватной работы сердца в условиях длительной невесомости, но и с анализом изменений параметров центрального кровообращения, расчетом силы и энергии сердечных сокращений, а также предусмотрено получение новых данных, связанных с возможностями проведения МРТ сердца до и после длительных космических полетов. Внедрение на современном этапе реализации эксперимента уникальных алгоритмов и методов МРТ сердца, а также оценки степени смещения центра масс тела, открывает перспективы для новых научных исследований и приоритета достижений российских ученых в этой области.

Авторы статьи выражают благодарность всем российским космонавтам, участвующим в исследованиях, а также сотрудникам ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина».

Исследования выполнены в рамках базовой темы РАН № 64.1 на 2013–2023 гг.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

- [1] Baevsky R.M., Chernikova A.G., Funtova I.I., Tank J. Assessment of Individual Adaptation to Microgravity During Long Term Space Flight Based on Stepwise Discriminant Analysis of Heart Rate Variability Parameters. *Acta Astronautica*, 2011, Vol. 69, No 11, 12, pp. 1148–1152.
- [2] Черникова А.Г., Баевский Р.М. Проблема физиологической нормы: математическая модель функциональных состояний на основе анализа вариабельности сердечного ритма // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2002. – № 6. – С. 11–17.
- [2] Chernikova A.G., Baevsky R.M. The Problem of Physiological Norm: a Mathematical Functional State Model Based on Analysis of Cardiac Rhythm Variability. *Aerospace and Environmental Medicine*, 2002, No 6, pp. 11–17.
- [3] Baevsky R.M., Baranov V.M., Funtova I.I., Diedrich A., Pashenko A.V., Chernikova A.G., Drescher J., Jordan J., Tank J. Autonomic Cardiovascular And Respiratory Control During Prolonged Spaceflights Aboard the International Space Station. *J Appl Physiol*. 2007 Jul; 103(1); Epub 2007 Apr 19; 156-61.

- [4] Баевский Р.М. Исследования вегетативной регуляции кровообращения в условиях длительного космического полета / Р.М. Баевский, Е.С. Лучицкая, И.И. Фунтова, А.Г. Черникова // Физиология человека. – 2013. – Т. 39. – № 5. – С. 42–53.
- [4] Baevsky R.M., Luchitskaya E.S., Funtova I.I., Chernikova A.G. Research of Autonomic Regulation of Blood Circulation in the Condition of Long-Term Space Flight. *Human Physiology*, 2013, Vol. 39, No 5, pp. 42–53.
- [5] Laurent S., Van Bortel L.M., Boutouyrie P., Chowienczyk P., Cruickshank J.K., De Backer T., Filipovsky J., Huybrechts S., Mattace-Raso F.U., Protogerou A.D., Schillaci G., Segers P., Vermeersch S., T. Weber. Expert Consensus Document on the Measurement of Aortic Stiffness in Daily Practice Using Carotid-Femoral Pulse Wave. Artery Society; European Society of Hypertension Working Group on Vascular Structure and Function; European Network for Noninvasive Investigation of Large Arteries. *Journal of Hypertens.* 2012, Mar; 30(3), pp. 445–448.
- [6] Oliver J.J., Webb D.J. Noninvasive Assessment of Arterial Stiffness and Risk of Atherosclerotic Events. *ArteriosclerThromb Vasc Biol.* 2003, Vol. 23, pp. 554–566.
- [7] Pietri P., Vyssoulis G., +4 authors Stefanadis C. Relationship Between Low-Grade Inflammation and Arterial Stiffness in Patients with Essential. *Journal of Hypertension.* 2006, Vol. 24, No 11, pp. 2231–2238.
- [8] Baevsky R.M., Funtova I.I., Luchitskaya E.S. Role of the Right and Left Parts of the Heart in Mechanisms of Body Adaptation to the Conditions of Long Term Space Flight According to Longitudinal Ballistocardiography. *Acta Astronautica.* 2021, Vol. 178, pp. 894–899.
- [9] Baevsky R.M., Funtova I.I., Tank J. Microgravity: an Ideal Environment for Cardiac Force Measuring. *Cardiometry.* 2013, Nov., No 3, pp. 100–118.