

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ АДАПТАЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ К ДЛИТЕЛЬНОМУ И БЕЗОПАСНОМУ ПРЕБЫВАНИЮ В НЕВЕСОМОСТИ

Р.М. Баевский, И.И. Фунтова, Е.С. Лучицкая

Докт. мед. наук, профессор Р.М. Баевский; канд. биолог. наук И.И. Фунтова;
канд. биолог. наук Е.С. Лучицкая (ГНЦ РФ–ИМБП РАН)

Статья посвящена изучению состояния сердечно-сосудистой системы и ее регуляторных механизмов неинвазивными методами, используемыми при постановке экспериментов на орбитальных станциях. Рассматриваются вопросы адаптации организма к условиям невесомости при длительных космических полетах.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, космический эксперимент, варибельность сердечного ритма, баллистокардиография, адаптация, регуляторные механизмы.

Some Features of Adaptation of the Cardiovascular System to a Long-term Weightlessness. R.M. Baevsky, I.I. Funtova, E.S. Luchitskaya

The paper deals with the study of the state of the cardiovascular system and its regulatory mechanisms by non-invasive methods applied in experiments on orbital stations. The issues of an organism adaptation to weightlessness during long-term space flights are considered.

Keywords: cardiovascular system, space experiment, heart rate variability, ballistocardiography, adaptation, regulatory mechanisms.

Дальнейшее развитие пилотируемой космонавтики неразрывно связано с длительными космическими полетами к Луне и, возможно, к другим планетам. При этом космическая медицина призвана обеспечить здоровье и высокую безопасную работоспособность членов экипажа в течение длительного пребывания организма в чуждой для него среде обитания. Поэтому годовые пилотируемые космические полеты являются важным этапом подготовки и апробации методик, средств и методов контроля за состоянием космонавтов.

Космические эксперименты, посвященные изучению сердечно-сосудистой системы человека, на протяжении многих лет, начиная с самых первых космических полетов, совершенствуются, в том числе благодаря успехам в развитии методов исследования и новым проблемам, которые встают перед учеными. С 2014 года на борту Международной космической станции (МКС) проводится медико-биологический эксперимент «Кардиовектор» с целью изучения и уточнения механизмов адаптации сердечно-сосудистой системы к длительному воздействию на организм человека условий и фак-

торов космического полета. Он направлен главным образом на исследование вегетативной регуляции кровообращения, изучение центральной гемодинамики и сократительной функции сердца [4].

Сеансы космического эксперимента «Кардиовектор» проводятся у российских космонавтов на борту МКС ежемесячно, а также дважды в предполетный период и после приземления. В ходе эксперимента производится запись электрокардиограммы, импедансной кардиограммы, сейсмокардиограммы, баллистокардиограммы (по трем взаимно перпендикулярным осям и трем осям вращения) и пневмотахограммы, что позволяет регистрировать и анализировать изменения в работе сердца в покое, а также при различных дыхательных тестах.

Закончившийся в марте 2016 года годовой полет российского космонавта явился рекордным по длительности пребывания на борту Международной космической станции. В ходе этого полета эксперимент «Кардиовектор» был проведен 11 раз. В определенной степени он может считаться аналогом проводившихся почти 20 лет назад экспериментов «Ночь» и «Пульстранс» в рекордном 438-суточном космическом полете на орбитальной станции «Мир» [3, 10].

В обоих длительных полетах применялись аналогичные методики: 1) анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР) для исследования вегетативной регуляции кровообращения; 2) баллистокардиография – для оценки сократительной функции сердца.

Однако за 20 лет, прошедших между двумя полетами, указанные методы исследования были существенно усовершенствованы и, фактически, коренным образом изменились. Традиционные методы анализа ВСР, включающие временной и частотный анализы временных рядов кардиоинтервалов, были дополнены принципиально новым вероятностным подходом, который на основе математических моделей функционального состояния реализует методологию донозологической диагностики с количественной оценкой степени напряжения регуляторных систем (СН) и их функционального резерва (ФР). Вероятностный анализ СН и ВР позволяет оценить адаптационные риски, т.е. вероятность развития донозологических и преморбидных состояний в условиях длительного космического полета [7, 11].

Баллистокардиография получила дальнейшее развитие как метод регистрации пульсовых колебаний тела одновременно по шести осям (пространственная баллистокардиография) – трем линейным осям и трем осям вращения. Это позволило практически реализовать теоретическую возможность изучения полной энергии движений тела в пространстве, вызванных выбросом крови из сердца в аорту и легочные сосуды [5].

Хорошо известно, что значительных сдвигов в основных показателях гемодинамики – таких, как ударный и минутный объем крови, давление, частота сердечных сокращений (ЧСС), скорость быстрого и медленного кровенаполнения, – не наблюдается. Это происходит благодаря механизмам регу-

лянии человеческого организма, однако эволюционировали они на Земле, а в условиях невесомости происходит перенастройка этих механизмов для достижения оптимального «привычного» состояния системы. Многочисленные публикации свидетельствуют о наличии нескольких периодов адаптации к невесомости – острой, неполной и относительно устойчивой адаптации [2, 7, 8, 9].

Переходя к результатам изучения вегетативной регуляции кровообращения необходимо заметить, что накопленный опыт по проведению и анализу подобных исследований дал возможность получить данные об изменениях механизмов регуляции сердечно-сосудистой системы с участием 25 российских космонавтов (КЭ «Пневмокард») [1, 6, 7]. Однако выяснилось, что после 6-месячного периода относительно стабильного функционального состояния наблюдаются разнонаправленные изменения параметров ВСП, указывающие на то, что организм находится в поиске нового уровня гомеостаза. На рисунках 1 и 2 представлена динамика изменений основных показателей ВСП во время годового полета на МКС. Интересно, что аналогичные физиологические реакции рассогласования наблюдались у российского космонавта на орбитальной станции «Мир» в эксперименте «Ночь» после 8-го месяца его пребывания в условиях невесомости [3, 8].

Необходимо отметить, что в послеполетном периоде на 4-е сутки после посадки частота пульса увеличивалась почти до 80 уд/мин в покое, а величина SDNN резко падала, при этом до нулевых значений падал показатель рNN50 и рос стресс-индекс, что указывает на активацию симпатического звена регуляции, обеспечивающего мобилизацию функциональных резервов.

Результаты эксперимента «Кардиовектор» показали, что после 185 суток полета отмечается рост величины стресс-индекса до максимально зарегистрированных значений за весь полет (216,9 усл. ед. на 250-е сутки полета) и мощности спектра ВСП в диапазоне очень медленных волн (VLF), который отражает активность уровня регуляции энерго-метаболических процессов. Анализируя эту закономерность, следует обратить внимание на публикацию данных со станции «Мир», которые свидетельствуют о том, что мощность VLF-составляющей в этот период полета тоже была значительно увеличена по сравнению с другими компонентами спектра. Авторами также приводятся данные, что в эксперименте «Ночь», где изучалась и гормональная регуляция, со 170-го по 287-й день полета определялся значительный рост концентрации адреналина в крови [8].

При анализе ВСП используются не только традиционные подходы математического и спектрального анализа, но и разработанная учеными нашего института математическая модель функциональных состояний организма [11], на основе обобщения результатов анализа variability сердечного ритма у всех российских космонавтов, совершавших полеты на станциях «Мир» и «МКС», а также в модельных экспериментах. Динамика показателей степени напряжения и функционального резерва (рис. 3) показывает,

что наиболее выраженными были отклонения на 163-и и 250-е сутки полета. Установленное таким образом увеличение адаптационного риска как раз коррелирует с увеличением мощности спектра сверхнизкочастотных колебаний в этот период.

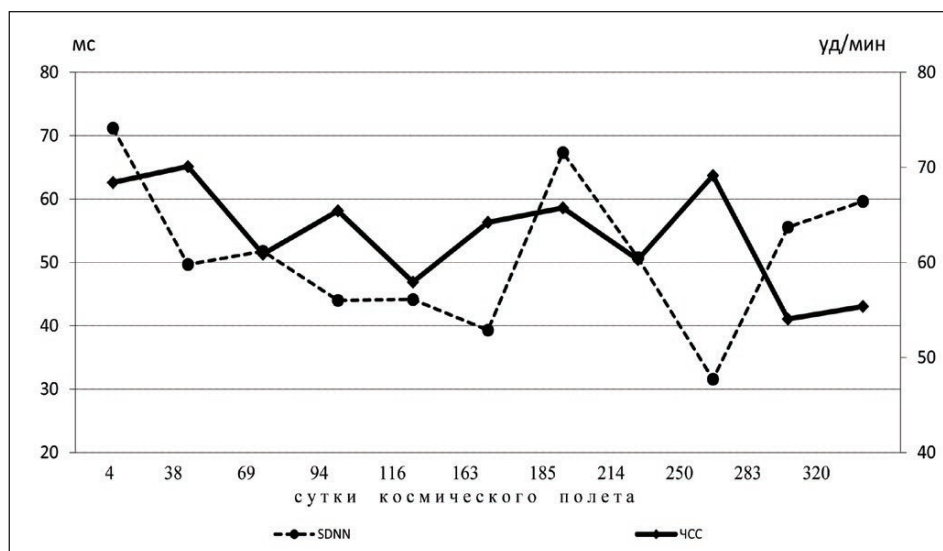


Рис. 1. Изменения ЧСС и SDNN на разных этапах длительного космического полета на МКС

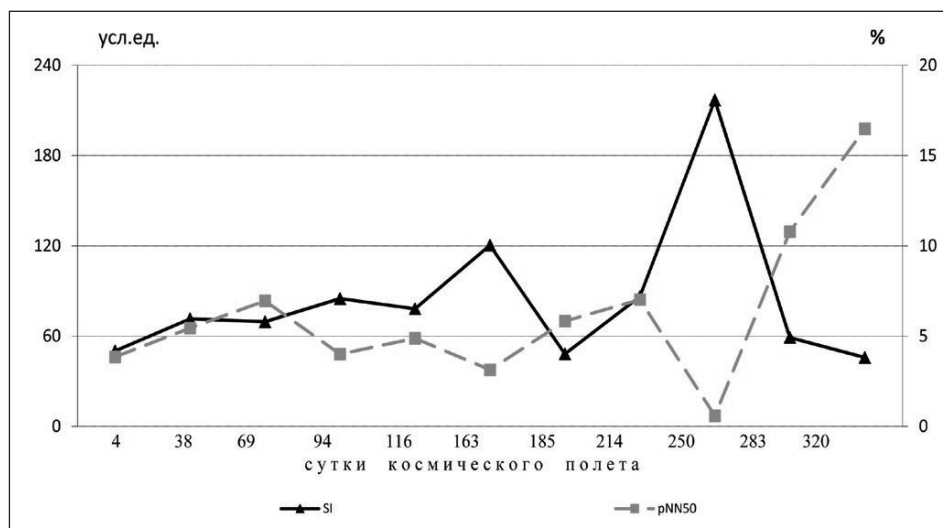


Рис. 2. Изменения pNN50 и SI на разных этапах длительного космического полета на МКС

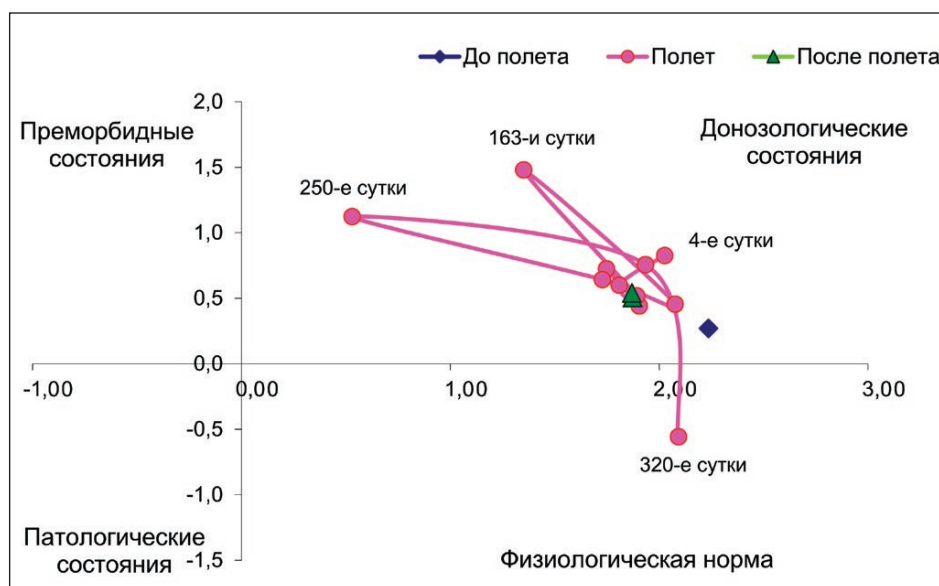


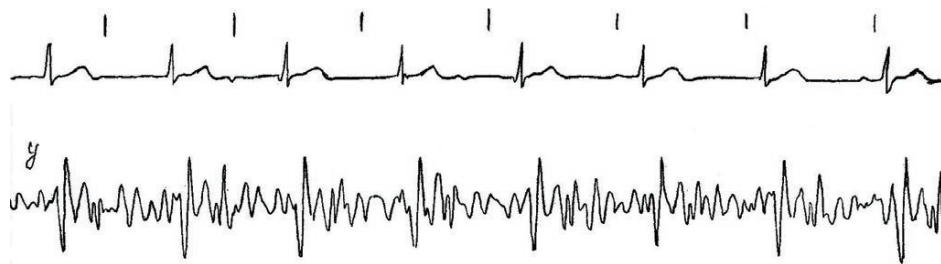
Рис. 3. Динамика показателей СН и ФР на разных этапах длительного космического полета на МКС

Таким образом, традиционный анализ ВСП показал почти полное совпадение закономерностей динамики активности основных звеньев вегетативной регуляции в двух рассматриваемых годовых полетах.

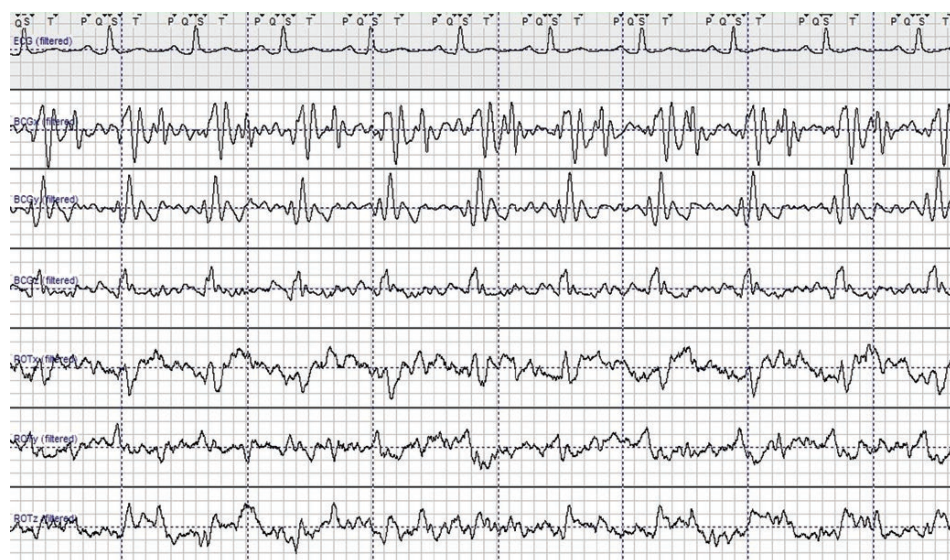
В эксперименте «Ночь» на ОС «Мир» регистрировалась одномерная линейная баллистокардиограмма. С 2014 года эксперимент «Кардиовектор» был оснащен специальным баллистокардиографическим датчиком, который позволяет записывать физиологические сигналы по трем взаимно перпендикулярным осям и трем осям вращения. Это дало возможность изучения пространственного распределения силы и энергии сердечных сокращений в разные периоды адаптации к условиям длительной невесомости (рис. 4).

Интересно, что имеются аналогии между результатами этих 2 исследований также и в баллистокардиографических данных. Анализ изменений формы БКГ записей в годовом космическом полете на МКС показал, что уже после нескольких дней пребывания в невесомости возникают изменения гемодинамики, которые проявляются ростом диастолических волн и искажениями нормальной формы БКГ.

В эксперименте «Ночь» также было отмечено значительное увеличение амплитуды и изменение формы баллистокардиографических комплексов, а параллельно с этим – сопровождающий их рост величины стресс-индекса. Как уже было отмечено, в годовом эксперименте «Кардиовектор» были выявлены аналогичные изменения.



А



Б

Рис. 4. А. Запись ЭКГ и БКГ по оси Y на станции «Мир».
Б. Запись ЭКГ и 6 осей БКГ на МКС

На рисунке 5 представлены графики, отражающие динамику изменений амплитудных показателей пространственной баллистокardiограммы по оси Y при задержке дыхания на вдохе и выдохе. Общей закономерностью является увеличение амплитуды по сравнению с предполетными значениями в 3, а то и в 4 раза. Для всех сегментов БКГ большая амплитуда наблюдается на вдохе, особенно четко это проявляется для сегментов ИJ и JK. Исключением являются первые дни пребывания в невесомости и 163-и сутки полета.

В первые дни пребывания организма в условиях микрогравитации параметры гемодинамики резко меняются. Активное перемещение масс крови в верхнюю часть тела и повышенное кровенаполнение легочного сосудистого русла не вызывают на вдохе заметного притока крови к правому

сердцу. Наоборот, требуется разгрузка малого круга кровообращения от избыточного объема крови. Такая «оперативная» разгрузка осуществляется левым желудочком. Так как функциональная проба с задержкой дыхания на вдохе и выдохе рассматривается с целью оценки активности правых и левых отделов сердца, то получаемые при этом записи БКГ представляют определенный интерес. Как видно из рисунка 5, на 4-е сутки полета по оси У наблюдается значительное увеличение амплитуды волн БКГ на выдохе. Этот же эффект появляется снова на 163-и сутки полета. А как раз в это время мы отмечаем переход от физиологической нормы в донологическое состояние и некоторое рассогласование в системе регуляции по данным ВСР.

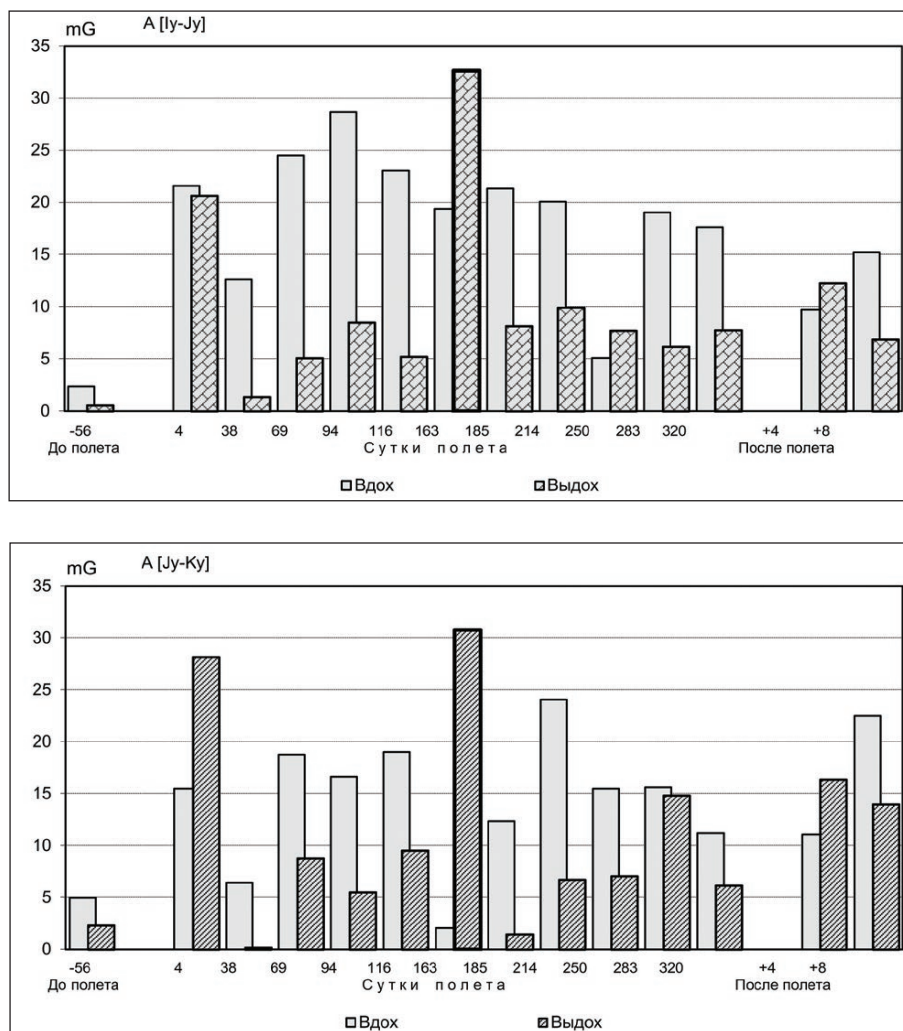


Рис. 5. Динамика амплитудных показателей пространственной баллистокardiограммы по оси У при задержке дыхания на вдохе и выдохе

Возможность оценки силы и энергии сердечного сокращения по данным пространственной баллистокардиографии – одна из задач космического эксперимента «Кардиовектор». На рисунке явно видны отличия усредненного кардиокомплекса БКГу на Земле и на 4-е сутки в невесомости. Видно также, что форма кривой и максимум силы сердечного сокращения очень похожи, а вот максимум энергии сердечного сокращения смещается к R-зубцу (рис. 6).

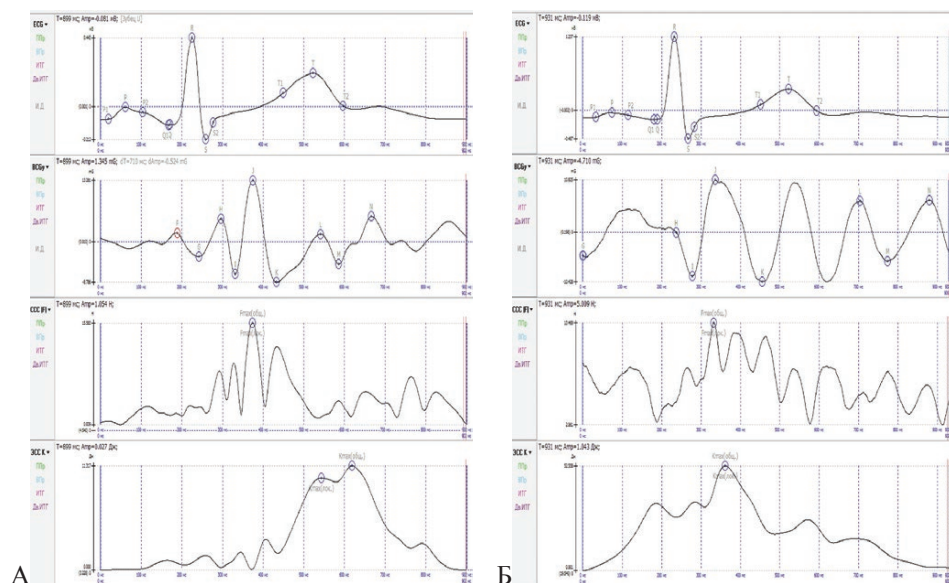


Рис. 6. Усредненные кардиокомплексы ЭКГ и БКГу, сила и энергия сердечного сокращения до полета (А) и на 4-е сутки пребывания в невесомости (Б)

Результаты пространственной баллистокардиографии в годовом полете на МКС подтвердили ранее сделанные выводы (на основании анализа данных предыдущих экспедиций) о более экономичной работе сердца в условиях невесомости. Сила сердечных сокращений уменьшалась незначительно, а в те же 163-и полетные сутки была даже больше предполетного уровня, но энергетические затраты существенно снижаются. Эти изменения подтверждают активацию энергетических процессов (отмеченное увеличение мощности сверхнизкочастотного компонента спектра ВСР) и, как следствие, увеличение адаптационного риска.

Выводы

Годовой полет российского космонавта на МКС подтвердил основной вывод, сделанный после рекордного 438-суточного полета врача-космонавта на ОС «Мир» о том, что резервы здоровья человека вполне достаточны для сверхдлительных космических перелетов, в том числе и к Марсу. Однако

полученные нами результаты подтверждают мнение многих специалистов, что 5–6 месяцев являются хорошо изученным и на данный момент оптимальным сроком пребывания человека в условиях невесомости. В течение этого времени успешно поддерживается внутрисистемный и межсистемный гомеостаз основных физиологических систем организма благодаря разработанным мерам профилактики. В дальнейшем же может наступать нестабильность функционального состояния, обусловленная тем, что в организме начинается поиск нового уровня гомеостаза, адекватного новым условиям окружающей среды. И в этот период необходимы оптимальные методы контроля и анализа функционального состояния организма человека для безопасного выполнения космического полета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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):156-61. Epub 2007 Apr 19.
- [2] Baevsky R.M., Funtova I.I., Diedrich A., Pashchenko A.V., Chernikova A.G., Drescher J., Baranov V.M., Tank J. Autonomic function testing on board the ISS - update on "Pneumocard". Acta Astronautica, 61 (2007), 7–8, 672–675.
- [3] Baevsky R.M., Moser M., Nikulina G.A., Polyakov V.V., Funtova I.I., Chernikova A.G. Autonomic regulation of circulation and cardiac contractility during a 14-month space flight. – Acta Astronautica. Volume 42, Issues 1–8, January–April 1998, pp. 159–173.
- [4] Funtova I., Luchitskaya E., Tank J., Baevsky R. Main results of space experiment Cardiovector and view of its further extension. 69 IAC International astronomical Congress. ID 44294.
- [5] Inan O.T., Migeotte P.-F., Park K.-S., Etemadi M., Tavakolian K., Casanella R., Zanetti J., Tank J., Funtova I., G.K. Prisk and M.Di Rienzo. Ballistocardiography and seismocardiography: a review of recent advances, IEEE J. Biomed. Health Inform., vol. 19, No. 4, pp. 1414–1427, Jul. 2015.
- [6] Баевский Р.М., Лучицкая Е.С., Фунтова И.И., Черникова А.Г. Исследования вегетативной регуляции кровообращения в условиях длительного космического полета. Физиология человека. Т. 39 № 5. 2013. – С. 42–53.
- [7] Баевский Р.М., Фунтова И.И., Лучицкая Е.С., Черникова А.Г. Изучение влияния длительной невесомости на вегетативную регуляцию кровообращения у членов экипажей международной космической станции. Космический эксперимент «Пневмокард». Клиническая информатика и Телемедицина. 2013. Т. 9. Вып. 10.
- [8] Григорьев А.И., Баевский Р.М. Концепция здоровья и космическая медицина, М., Слово, 2007, 220 с.
- [9] Космическая биология и медицина. Том. 3, книга 2. Человек в космическом полете. М., «Наука», 1997.
- [10] Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина. Том 1 и 2, М., 2002.
- [11] Черникова А.Г., Баевский Р.М. К проблеме физиологической нормы: математическая модель функциональных состояний на основе анализа вариабельности сердечного ритма. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2002, № 5. С. 34–37.

REFERENCES

- [1] 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):156-61. Epub 2007 Apr 19.
- [2] Baevsky R.M., Funtova I.I., Diedrich A., Pashchenko A.V., Chernikova A.G., Drescher J., Baranov V.M., Tank J. Autonomic function testing on board the ISS - update on "Pneumocard". *Acta Astronautica*, 61 (2007), 7–8, 672–675.
- [3] Baevsky R.M., Moser M., Nikulina G.A., Polyakov V.V., Funtova I.I., Chernikova A.G. Autonomic regulation of circulation and cardiac contractility during a 14-month space flight. – *Acta Astronautica*. Volume 42, Issues 1–8, January-April 1998. pp. 159–173.
- [4] Funtova I., Luchitskaya E., Tank J., Baevsky R. Main results of space experiment Cardiovector and view of its further extension. 69 IAC International astronomical Congress. ID 44294.
- [5] Inan O.T., Migeotte P.-F., Park K.-S., Etemadi M., Tavakolian K., Casanella R., Zannetti J., Tank J., Funtova I., G.K. Prisk and M.Di Rienzo. Ballistocardiography and seismocardiography: a review of recent advances, *IEEE J. Biomed. Health Inform.*, Vol. 19, No. 4, pp. 1414–1427, Jul. 2015.
- [6] Baevskiy R.M., Luchitskaya E.S., Funtova I.I., Chernikova A.G. Studies of the vegetative regulation of blood circulation under conditions of a long-term space flight. *Human physiology*. V. 39, No 5. 2013. pp. 42–53.
- [7] Baevskiy R.M., Funtova I.I., Luchitskaya E.S., Chernikova A.G. Studying the long-term influence of weightlessness on the vegetative regulation of blood circulation of the ISS crew members. SE "Pnevмокard". *Clinical Informatics and Telemedicine*. 2013. V. 9. Issue 10.
- [8] Grigiryev A.I., Baevskiy R.M., *The concept of health and space medicine*, Moscow, Slovo, 2007. p. 220.
- [9] *Space biology and medicine*. V. 3, Book 2. Man in space flight. Moscow, Nauka, 1997.
- [10] *Mir space station. Space Biology and Medicine*. V. 1 and 2, Moscow, 2002.
- [11] Chernikova A.G., Baevskiy R.M., *The problem of physiological norm: a mathematical model of functional status based on the analysis of heart rate variability*. *Aerospace and environment medicine*, 2002, No 5. pp. 34–37.