

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РЕГУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗОЛЯЦИИ (ЭКСПЕРИМЕНТ SIRIUS-17)¹

INVESTIGATION OF CARDIOVASCULAR SYSTEM REGULATORY MECHANISMS IN ISOLATION (SIRIUS-17 EXPERIMENT)

V. Rusanov
R. Baevsky

Summary. The daily electrocardiogram records were analyzed under conditions of 17-day isolation. During the analysis of diurnal dynamics of heart rate variability indices, the relationship between neurovegetative and metabolic-energy processes in the cardiovascular system was studied. The role of autonomic regulation of blood circulation in ensuring adequate functioning of the heart during isolation in the hermetic object was studied.

Keywords: cardiovascular system, electrocardiogram, vegetative regulation of blood circulation, isolation.

Русанов Василий Борисович

К.б.н., доцент, ФГУН ГНЦ РФ — Институт медико-биологических проблем РАН
vasilyrusanov@gmail.com

Баевский Роман Маркович

Д.б.н., г.н.с., ФГУН ГНЦ РФ — Институт медико-биологических проблем РАН

Аннотация. В исследовании проанализированы суточные записи электрокардиограммы в условиях 17-и дневной изоляции. В ходе анализа суточной динамики показателей variability сердечного ритма была изучена взаимосвязь между нейровегетативными и обменно-энергетическими процессами в сердечно-сосудистой системе. Изучалась роль вегетативной регуляции кровообращения в обеспечении адекватной работы сердца во время изоляции в гермообъекте.

Ключевые слова: сердечно-сосудистая система, электрокардиограмма, вегетативная регуляция кровообращения, изоляция.

Введение

Последствиями пребывания человека в условиях изоляции являются истощение и астенизация регуляторных систем, что, как правило, приводит к нарушениям гомеостаза и развитию патологических состояний. Адаптационные возможности организма поддерживаются, в большинстве случаев, за счет функциональных резервов механизмов регуляции. Поэтому, важной задачей является разработка прогностических критериев для раннего распознавания снижения функциональных резервов как одного из факторов срыва адаптации. В современной космической медицине важность этого факта обусловлена планированием межпланетных перелетов в самое ближайшее время.

Активные исследования, связанные с подготовкой пилотируемых межпланетных полетов обусловили цель настоящего исследования, которая заключалась в изучении функционального резерва механизмов регуляции кровообращения в условиях изоляции, имитирующей полет на космическом корабле к ближайшим планетам. Исследование выполнено в рамках проекта SIRIUS, кото-

рый проводится в ГНЦ РФ ИМБП РАН с 2017 г. [1]. Представлены данные, полученные в ходе 17-и дневной изоляции (SIRIUS-17).

Для изучения различных уровней системы управления кровообращением использовался метод анализа variability сердечного ритма (BCP). В настоящее время этот метод используется как прогностический для оценки и прогноза ранних этапов наступления срыва в системе кровообращения и оценки рисков патологических процессов в этой системе [2,3]. Космическая медицина была одной из первых областей науки и практики, где анализ BCP был использован для получения новой научной информации и решения задач медицинского контроля за человеком, выполняющим свою работу в экстремальных условиях [4]. Новый шаг в изучении вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости был сделан в течение последнего времени в результате проведения на борту Международной космической станции (МКС) научного эксперимента «Космокард». «Космокард» — методика, включенная в программу долговременных исследований на МКС. Методика позволяет: изучать возможности раннего выявления вероятных донозологических (пред-

¹ Работа выполнена в рамках базовой темы РАН 64.1 на 2013–2020 гг.

патологических) отклонений на основе анализа вариабельности сердечного ритма [5].

Материал и методы

В ходе исследования проведены суточные записи электрокардиограммы (холтеровское мониторирование) в условиях 17-и суточной изоляции в гермообъекте у 3-х добровольцев-мужчин (возраст $36,7 \pm 3,7$ лет). Исследования проводились за 7 суток до изоляции, в изоляции в 6-е и 12-сутки, после изоляции на 3-е. Изучалась роль вегетативной регуляции кровообращения в обеспечении адекватного уровня функционального состояния сердечно-сосудистой системы. В ходе анализа суточной динамики показателей вариабельности сердечного ритма была изучена взаимосвязь между нейровегетативными и обменно-энергетическими процессами кровообращения. При анализе полученных сигналов ЭКГ проводился анализ вариабельности сердечного ритма (BCP) по 5-минутным интервалам времени. Вычислялись разностные значения (утро-вечер) для различных показателей BCP, характеризующих уровни автономной и центральной регуляции [6]. Уровень автономной регуляции отражается показателем SD (стандартное отклонение) и RMSSD (сумма квадратов разностей длительности кардиоинтервалов). Состояние центрального контура регуляции, активность симпатического отдела вегетативной регуляции характеризовалось индексом напряжения регуляторных систем (ИН). Активность сосудистого центра отражалось мощностью низкочастотной части спектра сердечного ритма (медленные волны 1-го порядка — MB-1). Для оценки надсегментарных уровней регуляторного механизма (высшие вегетативные центры) анализировались мощность очень низкочастотных колебаний сердечного ритма (медленные волны 2-го порядка — MB-2).

Программа исследований рассмотрена и одобрена комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ — ИМБП РАН.

При статистической обработке данных вычислялись средние значения и ошибки средних, достоверность различий определялась по t-критерию Стьюдента.

Результаты

Данные холтеровского мониторирования показывают, что уже на 6-е сутки пребывания в изоляции среднесуточные значения частоты пульса и индекса напряжения регуляторных систем снижаются, а среднеквадратичное отклонение растут. Это указывает на смещение вегетативного баланса в сторону снижения симпатических и усиления парасимпатических влияний. Однако, как видно из рисунка 1 наблюдается снижение

относительной мощности дыхательных волн (B %), что отражает ослабление влияния дыхательного центра на кровообращение через ядра блуждающего нерва. Подобная картина, в целом, сохраняется в течение всего 17-и дневного эксперимента.

В таблице 1 представлены средние значения частоты пульса, и некоторых показателей вариабельности сердечного ритма. Поскольку, наблюдаемые изменения, носили индивидуальный характер, рассмотрим в отдельности реакцию каждого испытуемого.

У испытуемого В в изоляции наблюдалось некоторое напряжение регуляторных систем с учащением пульса, увеличением ИН, снижением среднего квадратичного отклонения (СКО) и относительной мощности дыхательных волн в вечернее время. Сравнение этих данных с их утренними значениями указывает на сохранение хорошего функционального резерва. После изоляции признаки напряжения регуляторных систем сохранились, но при более низком функциональном резерве.

Испытуемый А отличался тем, что в гермообъекте у него отмечался четкий сдвиг вегетативного баланса в сторону усиления тонуса парасимпатического отдела. Это сопровождалось достоверным уменьшением частоты пульса и дыхания, ростом СКО и мощность дыхательных волн, снижением ИН. Однако, отсутствие значимых различий между вечерними и утренними величинами показателей указывает на снижение функциональных резервов регуляции. В конце эксперимента урежение пульса сохранилось на фоне роста вечерне-утренних различий всех показателей, что можно считать признаком увеличения резервных возможностей.

Стратегия адаптации испытуемого С характеризовалась отсутствием существенных отличий от исходного состояния. К концу пребывания в гермообъекте и после выхода из него у этого испытуемого в вечерние часы наблюдались явления функционального напряжения, которые к утру нормализовались.

Таким образом, несмотря на выраженную индивидуальность реакций испытуемых, общим для них было наличие функционального напряжения в изоляции. Только у испытуемого А отмечался сдвиг вегетативного баланса в сторону усиления парасимпатического тонуса. Функциональные резервы регуляторных механизмов к концу эксперимента не снижались, а имели тенденцию к росту.

Реакция напряжения регуляторных систем может сопровождаться увеличением относительной мощности медленных волн 1-го либо 2-го порядка. В первом случае это связано с ростом сосудистого тонуса и обычно, с подъемом артериального давления. Чаще всего при-

Таблица 1. Изменения частоты пульса и некоторых показателей variability сердечного ритма в эксперименте

Испытатель	Этап	Время суток	ЧП, уд/мин.	СКО, мс.	ИН, у.е.	ДВ,%	МВ-1,%	МВ-2,%
В	Фон	Вечер	59,7±0,6	66±0,4	49±1,1	50±0,3	21±0,1	29±1,5
		Утро	67,3±0,1	51±0,1	95±3,8	40±1,7	24±0,8	36±0,7
	6-е сутки	Вечер	73,6±0,1	38±0,5	158±0,2	27±1,1	36±1,2	37±1,3
		Утро	54,5±0,9	90±0,1	29±0,7	46±1,0	24±0,9	30±1,4
	12-е сутки	Вечер	63,1±0,3	39,2±2	131±12	43,1±2	29,7±3	27,2±3
		Утро	60,2±0,1	59,5±1	45,3±2	41,8±3	35,8±4	22,4±2
А	Фон	Вечер	73,7±0,1	21±0,4	422±18,1	18±1,0	20±1,2	62±1,7
		Утро	65,5±0,1	32±0,9	218±6,9	24±1,4	20±0,7	57±1,7
	6-е сутки	Вечер	56,0±0,1	55±0,7	69±2,3	29±2,0	28±1,2	43±2,3
		Утро	55,0±0,1	55±0,7	65±1,3	25±1,8	41±1,5	34±1,9
	12-е сутки	Вечер	61,2±0,1	35±1,3	136±8,8	28±3,7	29±2,1	43±2,8
		Утро	57,5±0,2	60±2,4	54±3,7	15±2,7	25±4,6	60±7,2
С	Фон	Вечер	61,3±0,1	65±0,5	51±1,0	5±0,1	81±1,4	14±1,4
		Утро	48,7±0,1	93±1,7	26±1,0	15±0,4	34±1,2	51±1,4
	6-е сутки	Вечер	54,2±0,1	68±1,0	46±1,4	11±0,6	59±1,6	30±1,4
		Утро	49,2±0,1	80±0,9	30±0,8	19±1,3	46±2,8	34±2,4
	12-е сутки	Вечер	68,9±0,2	40±0,8	116±5,6	17±2,5	42±2,3	41±2,3
		Утро	49,5±0,3	92±8,0	26±3,6	11±2,1	53±4,6	36±6,1

чиной такой реакции является длительный стресс или утомление. При увеличении относительной мощности медленных волн 2-го порядка речь может идти о психоэмоциональном стрессе, связанном с возбуждением коры головного мозга с соответствующей активацией энергетических и метаболических процессов. Примером такой реакции служат фоновые данные испытуемого А, который перед началом эксперимента находился в состоянии выраженного функционального напряжения. Однако, усиление энергетических процессов может быть обусловлено и мобилизацией функциональных резервов в ходе реадaptации при воздействии восстановительных процедур либо во время ночного сна или отдыха [7]. Такие реакции связаны с активным восстановлением израсходованных функциональных резервов, если их запас достаточен и регуляторные механизмы не истощены. Такие реакции наблюдались

у испытуемого А в изоляции и у испытуемого С в фоновый период.

Разностные значения показателей ВСР отражают характер и выраженность восстановительных процессов, которые являются важным компонентом ночного отдыха [8]. При анализе этих разностных значений нами была выявлена индивидуальная динамика колебаний. При этом, колебания различных показателей не синхронизированы. На основании анализа особенностей наблюдаемых колебаний мы попытались оценить индивидуальные особенности работы механизмов регуляции кровообращения.

У испытуемого В увеличение разностных значений всех показателей на момент первого исследования (6-е сутки изоляции) может указывать на относительный

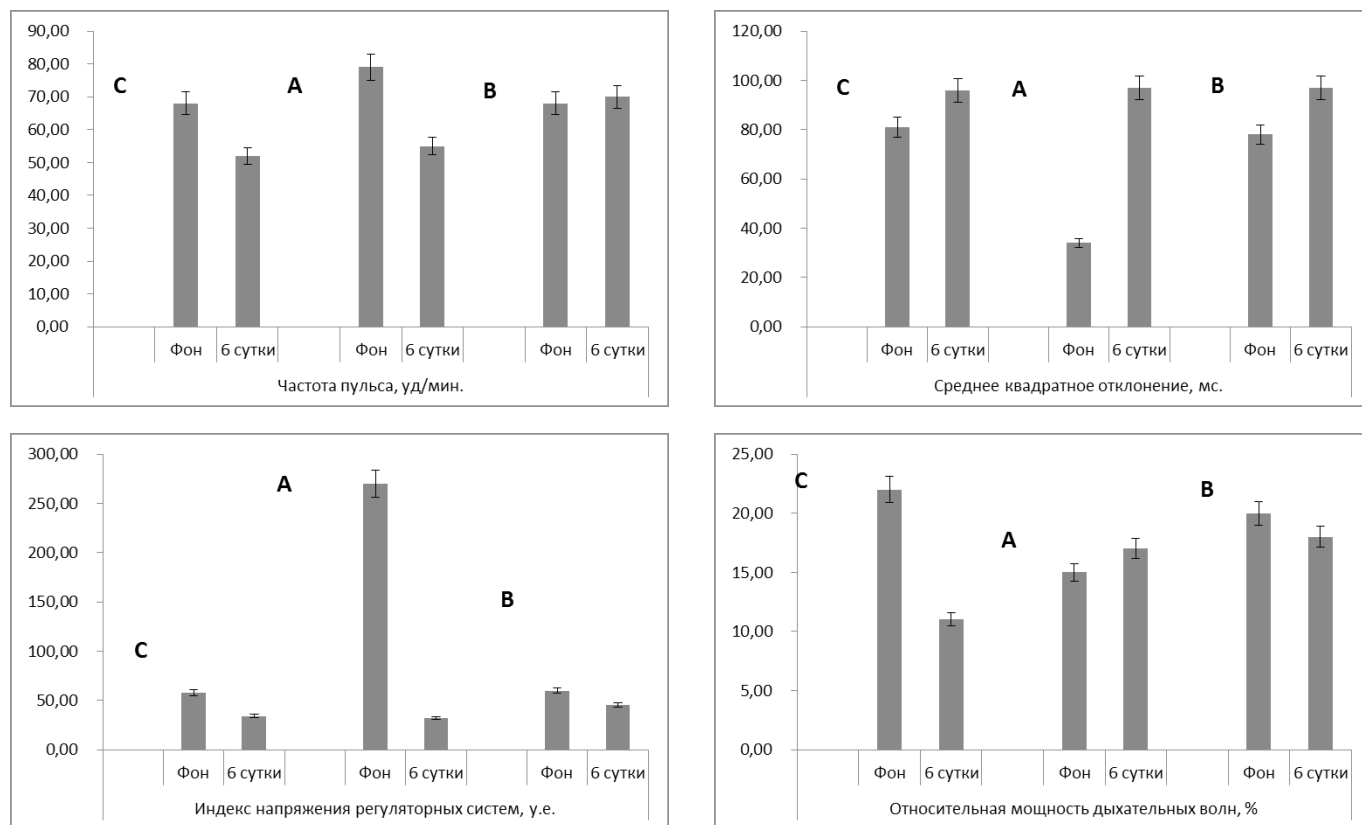


Рис 1. Изменения частоты пульса и некоторых показателей variability сердечного ритма в условиях изоляции

рост функциональных резервов (активацию восстановительных процессов) по сравнению с фоном. Некоторое снижение адаптационных возможностей наблюдалось во время второго исследования (12-е сутки изоляции).

У испытуемого А, судя по разностным значениям ИН, адаптационные возможности организма в течение всего эксперимента были снижены. Наблюдались компенсаторные реакции со стороны пульса и механизмов регуляции сосудистого тонуса (МВ-1). При этом, изменения сосудистого тонуса были вторичными по отношению к частоте пульса.

Испытуемый С отличался наличием нескольких фаз активации адаптационных механизмов (6-е, 12-е сутки изоляции и 3-е сутки после нее). При этом вторая фаза (12-е сутки в гермообъекте) может рассматриваться как компенсаторная реакция на снижение активности механизмов регуляции сосудистого тонуса. Вместе с этим у испытуемого была выявлена глубокая отрицательная фаза после выхода из гермообъекта. Можно предположить, что это связано с истощением функциональных резервов. Такая интерпретация подтверждается данными холтеровского монитори-

рования, где дизадаптация проявляется нарушениями суточной периодики функций. В ночное время частота пульса увеличивается, variability снижается, мощность дыхательных волн уменьшается. Все это является признаками снижения функциональных резервов и ухудшения восстановительного процесса в ночной период [9].

Таким образом, адаптационные реакции организма на факторы изоляции весьма индивидуальны. Можно предполагать, что отсутствие существенных отклонений жизненно важных параметров, в том числе показателей функционирования кровообращения, обеспечивается соответствующими адаптационными и компенсаторными реакциями, активной деятельностью механизмов регуляции [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Проведенные исследования показали, что предложенный подход к изучению функциональных резервов регуляции системы кровообращения с анализом variability различных показателей в вечерние и утренние часы суток является достаточно эффективным и информативным. Дополнительную информацию для оценки функциональных резервов регуляции кро-

вообращения позволяет получить холтеровское мониторирование. На основе результатов проведенных в изоляции исследований могут быть предложены следующие критерии для оценки уровня снижения функциональных резервов:

1) Уменьшение разности между вечерними и утренними значениями показателей variability сердечного ритма, особенно показателей, отражающих активность симпатического звена вегетативной регуляции;

2) Нарушение суточной периодики функций, в частности, отсутствие ночного снижения частоты пульса.

Периодические изменения активности регуляторных механизмов можно отнести к числу фундаментальных закономерностей процесса адаптации организма к новым условиям. Возможно, эти периодические изменения связаны со временем накопления и расходования функциональных резервов в различных системах и на разных уровнях регуляции. Речь идет о регулятор-

ных, метаболических и энергетических резервах. Использованная нами в эксперименте с изоляцией методология позволяет исследовать функциональные резервы механизмов регуляции кровообращения достаточно простым способом по показателям variability кардиологических показателей, измеряемых вечером и утром для оценки процессов восстановления. Этот подход представляется перспективным для различных областей прикладной физиологии. Особенно он важен для космической медицины, учитывая ограниченные возможности проведения сложных исследований в условиях космического полета. Описанные выше исследования в условиях изоляции с использованием образцов бортовой аппаратуры и схемы одного из бортовых экспериментов показали, что разработанные методологические подходы вполне адекватны задаче изучения и оценке функциональных резервов организма у экипажей МКС. В связи с этим, полученные результаты будут использоваться в качестве базовой информации при разработке оценочных критериев применительно к космическим экипажам.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://sirius.imbp.info/>
2. Hillebrand S, Gast KB, de Mutsert R, Swenne CA, Jukema JW, Middeldorp S, Rosendaal FR, Dekkers OM. Heart rate variability and first cardiovascular event in populations without known cardiovascular disease: meta-analysis and dose-response meta-regression. *Europace*. 2013;15:742–9.
3. Thayer JF, Yamamoto SS, Brosschot JF. The relationship of autonomic imbalance, heart rate variability and cardiovascular disease risk factors. *Int. J. Cardiol*. 2010; 141:122–131.
4. Orlov O., Pougachev V., Baevsky R., Chernikova A. Spase medicine, telemedical ecology and telemedicine: prospects for cooperation and development. . *Med@Tel. Global Telemedicine and eHealth updates; Luxembourg; Luxembourg*; 2013.
5. Rusanov, V., Bersenev, E., Cherrikova, A., Ivanov, G., Baevsky, R. The electrofisiological changes in the myocardium and heart rate variability during spaceflight (Preliminary Data). *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 2015, c. 313–317.*
6. Heart rate variability. Standards of mesurement, physiological interpretation and clinical use//*Circulation*. — 1996. — Vol.93. — P. 1043.
7. Baevsky RM, Chernikova AG, Funtova II, 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* 69 (2011) pp. 1148–1152.
8. Baevsky R.M., Moser M., Funtova I.I., Nikulina G. A. et al. Autonomic regulation of circulation and cardiac contractility during a 14-month space flight, *Acta astronautica*, 1998, vol. 42, p. 159–173.
9. Baevsky RM, Baranov VM, Funtova II, Diedrich A, Pashenko AV, Chernikova AG, 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.
10. Baevsky R.M., Berseneva A. P., Slepchenkova I. N., Chernikova A. G. Issues of health evaluation during simulated space mission to Mars. Assessment of adaptation reactions in the participants of the long-term medical and ecological investigations during the experiment Mars-500 // *Cardiometry*, 2013, № 2, p. 74–88.

© Русанов Василий Борисович (vasilyrusanov@gmail.com), Баевский Роман Маркович.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»