

Посвящается 110-летию со дня рождения  
основателя космической кардиологии  
академика Василия Васильевича Парина

УДК 613.614:613.693

# Баллистокардиография и сейсмокардиография в российской космической медицине. Краткий исторический обзор

Р. М. Баевский<sup>1</sup>, И. И. Фунтова<sup>1</sup>, Й. Танк<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Высшая медицинская школа, Ганновер, Германия

## Резюме

В настоящей статье представлен краткий обзор применения методов баллистокардиографии и сейсмокардиографии в космической медицине. При этом использованы, главным образом, результаты исследований, выполненных в России. Неинвазивные методы изучения сердечно-сосудистой системы, такие как механокардиография, были очень популярны в России и имеют большую историю. Они широко применялись в профессиональной, спортивной, авиационной и космической медицине более 60 лет. Первая сейсмокардиограмма (СКГ) в космосе была записана у животных (собак) во время полета третьего искусственного спутника земли в декабре 1960 года. СКГ записи при полете человека были получены во время полета космических кораблей «Восток-5» и «Восток-6» в 1963 году. Первая баллистокардиограмма (БКГ) в космосе была зарегистрирована у командира экипажа орбитальной станции (ОС) «Салют-6» Юрия Романенко в 1977 году. На борту орбитальных станций «Салют-6» и «Салют-7» записи продольных БКГ были проведены в начальном периоде невесомости (1981, совместный советско-румынский полет) и в длительном полете (4-ая экспедиция, 183 дня), а первая пространственная БКГ (с последовательной регистрацией по трем осям) была получена в 1984 году в совместном советско-индийском полете. Бортовой эксперимент «Вектор» с применением СКГ и 3-х мерной пространственной БКГ был проведен

на борту орбитальной станции «Мир» (6-ая экспедиция, 1990 год). На орбитальной станции «Мир» были также проведены исследования БКГ в самом длительном 14-месячном космическом полете и исследования БКГ в ночной период суток. В новом космическом эксперименте «Кардиовектор» на Международной космической станции, который должен начаться в 2013–14 г.г. будет проводиться запись БКГ по 6 осям (3 линейных оси и 3 оси вращения). Этот подход при использовании новых методов обработки и анализа данных позволит лучше понять сложное взаимодействие между «сердечными силами» (ускорением и векторами смещения) и гемодинамическими параметрами, которое до сих пор не могло быть изучено в условиях невесомости. Эта информация может быть в будущем использована в целях улучшения медицинского контроля членов экипажа и для того, чтобы оценить индивидуальную сердечно-сосудистую адаптацию к длительной невесомости.

**Ключевые слова:** баллистокардиография, сейсмокардиография, космическая медицина, мониторинг здоровья, физиология кровообращения, невесомость.

**Клин. информат. и Телемед.**  
**2012. Т.8. Вып.9. с.99–111**

## Введение

История развития баллистокардиографии начинается с 1877 года и многочисленные попытки улучшить методы регистрации, уменьшить искажения и установить нормативы для клинического использования этого метода дают живописную картину целой эры исследований сердечно-сосудистой системы. Библиография, охватывающая период с 1877 до 1964 годы иллюстрирует, сколько ученых проявили интерес к этому научному направлению [1]. Литературный поиск в PubMed с 1947 до 2011 г.г. показал 1925 ссылок. Самое высокое число публикаций в год может быть найдено в десятилетие от 1950 по 1980 гг. После этого статьи по БКГ почти полностью исчезли. Однако повышение интереса к этому методу в течение прошлых нескольких лет вновь показало увеличение числа публикаций. Большое число публикаций по баллистокардиографии было сделано в 60–70-е годы в СССР. Это было связано с развитием профилактического направления. Концепция массовых профилактических осмотров населения начала развиваться еще в пятидесятые годы прошлого столетия [2]. В последующие два десятилетия в этом направлении были достигнуты значительные успехи [3, 4].

В. В. Парин — основатель космической кардиологии и космической медицины — развивал подход, основанный на оценке состояния регуляторных механизмов, изменения которых предшествуют патологическим изменениям в различных системах и органах [5, 6]. Он также постулировал положение о том, что с помощью чувствительных методов могут быть выявлены сверхранние предпатологические изменения в организме. В этом плане классические клинические методы могут терпеть неудачу. Поэтому, он предложил использовать СКГ и БКГ как инструменты для превентивной оценки изменений кардиодинамики, особенно при их использовании с применением простых функциональных тестов.

Первый российский баллистокардиограф был разработан в 1954 году и БКГ начала широко использоваться в СССР в профессиональной, спортивной и авиационной медицине, а также при профессиональном отборе лиц, работа которых связана с повышенной нагрузкой на сердечно-сосудистую систему [7]. Обзор этих первых БКГ исследований был представлен на Первой национальной конференции по баллистокардиографии в СССР, а также в публикациях одного из авторов этой статьи — бывшего сотрудника лаборатории В. В. Парина [2, 8, 9].

В. В. Парин особенно интересовался вопросами адаптации сердца к физическим нагрузкам, температурным воздействиям и исследованием венозного возврата и энергетики сердца, что нашло отражение в его ранних работах 30-х годов прошлого столетия [10]. Он писал о своей мечте об использовании баллистокардиографии для измерения

сердечных сил в условиях невесомости, где можно определить внешнюю работу сердца простым измерением ничем неискаженного смещения центра масс тела у свободно «плавающего» в пространстве человека.

Несмотря на большой энтузиазм в освоении метода БКГ [11] В. В. Парин и его коллеги указывали, что СКГ и БКГ отражают преобразование сердечных сил в движение тела только качественно. Однако он продвигал использование БКГ в СССР, зная, что вычисление количественных индексов, подобных ударному объему крови, может идти с использованием других более точных методов. Однако в пятидесятые годы получили развитие некоторые новые модели БКГ — приборов, что обеспечило дальнейшее продвижение в области сердечно-сосудистой физиологии [4, 12–16].

В. В. Парин осуществил перевод на русский язык книги по БКГ, написанной Вильямом Доком и братьями Мандельбаум [42]. Эта книга, опубликованная на русском языке в 1956 году, оказала серьезную поддержку специалистам, в том числе при использовании этого метода в космической кардиологии.

Новые технологии, более миниатюрные и точные акселерометры, а также улучшенные алгоритмы обработки данных обеспечили возрождение старой техники. Техника удобного и дешевого баллистокардиографического контроля может действительно обеспечить достаточную информацию для превентивного слежения за здоровыми людьми и за пациентами с сердечно-сосудистыми болезнями, а также для других применений этого метода [16–23].

Ниже представлен краткий обзор использования БКГ и СКГ в авиации и космической медицине (в основном в России). В нем кратко описываются также перспективы применения этих методов для исследований сердечно-сосудистой системы на борту Международной Космической станции (МКС).

## Авиационная медицина

Преимущества баллистокардиографии в простоте техники записи и в отсутствии необходимости применения электродов, были уже в 1955–56 г.г. использованы в авиационной медицине для проведения предполетных исследований пилотов ( ). Для этого был создан прибор для прямой баллистокардиографии (рис. 1), который был затем активно использован для массовых профилактических обследований. На этот прибор был получен патент СССР № 110652 [7].

Прибор состоял из двух платформ (300х80х10 мм), связанных четырьмя плоскими пружинами из пластмассы (60х30х3 мм). U-образный магнит был закреплен на нижней платформе, а блок индуктивности был связан с верхней платформой. Это устройство располагалось под голенями лежащего человека. Микродвижения тела человека, обусловленные сердечными сокращениями, передавались верхней

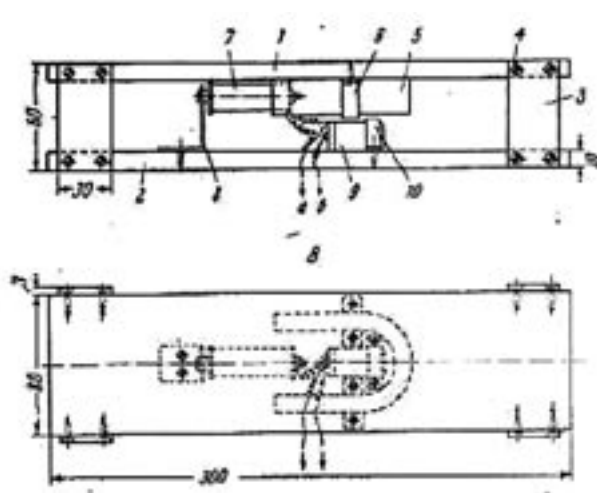


Рис. 1. Первый советский баллистокардиограф (слева), использовавшийся для массовых обследований населения в 50–60-е годы прошлого века. Справа детали конструкции прибора.

платформе, которая смещалась по отношению к нижней. При этом в блоке индуктивности возникал электрический потенциал, пропорциональный скорости смещения. Для получения правильной полярности сигнала на верхней платформе имелась гравировка (голова-ноги). Собственная частота системы был равна 50 герцам, но с грузом в 10 кг она снижалась до 30–40 герц.

Этот портативный прибор был применен для предполетного обследования 122 пилотов, полученные результаты сравнивались с результатами клинического электрокардиографического исследования. При этом в трех случаях с нормальной ЭКГ были обнаружены патологические изменения баллистокardiограммы. У этих пилотов при более подробном клинико-инструментальном обследовании были обнаружены отклонения со стороны сердечно-сосудистой системы [7].

## Космическая медицина

С первых шагов космической медицины и физиологии академик В. В. Парин предложил использование СКГ и БКГ в условиях невесомости [10]. Он предполагал, что измерение изменений функции сердца в этих условиях будет одной из главных задач нового научного направления — космической кардиологии [24]. Поэтому уже в первых пилотируемых полетах для контроля здоровья экипажа использовались механокардиографические методики. Первые сейсмокардиограммы были зарегистрированы у членов экипажей в полетах кораблей «Восток-5» и «Восток-6» в 1963 году [26]. СКГ использовалась для оценки фазовой структуры сердечного цикла, в частности, времени изгнания, а также для определения изменений соотношения между амплитудами систолических и диастолических компонентов в течение полета. Время изгнания в полете было увеличено у обоих космонавтов. Соотношение амплитуд оставалось устойчивым.

Для записи баллистокardiограммы в условиях невесомости необходима была разработка трехмерной системы регистрации, поскольку классические продольные БКГ в направлении «голова-ноги» были неадекватны для этих условий, так как они не учитывали влияния боковых и дорсовентральных

компонентов пульсовых движений тела в свободной от силы тяжести среде [27, 28]. Поэтому регистрация БКГ стала возможной только на первых орбитальных станциях, где имелось необходимое пространство для свободного «парения» тела человека.

В 2013 году исполняется 50 лет советским и российским исследованиям сократительной функции сердца методами сейсмокардиографии и баллистокardiографии [26]. Космическая кардиология с первых шагов рассматривала сердечно-сосудистую систему как индикатор адаптационных реакций всего организма и указывала на необходимость целостного подхода при ее исследовании в условиях космического полета [24]. К сожалению, специалисты по космической медицине основное внимание обращали на проблемы ортостатической устойчивости, т. е. на изучение сосудистой системы. Только группа ученых — последователей академика В. В. Парина в Институте медико-биологических проблем в Москве в течение полувека последовательно изучала состояние сердца в условиях невесомости — его сократительную функцию и вегетативную регуляцию. В табл. 1 представлены этапы сейсмокардиографических и баллистокardiографических исследований в космосе. Ниже мы подробно рассмотрим результаты исследований на каждом из указанных этапов, однако, следует отметить, что в отличие от исследований вегетативной регуляции кровообращения за последние несколько десятилетий баллистокardiография не получила широкого применения в земной медицине и в практике здравоохранения, хотя в 50–60-е годы прошлого века этот метод был весьма популярным.

### ОС «Салют-6», 1-ая экспедиция

10 декабря 1977 началась первая экспедиция на орбитальной станции «Салют-6». Экипаж в составе Юрия Романенко и Георгия Гречко прибыл в транспортном корабле «Союз-26» на борт станции и оставался там 96 дней. В первый же месяц полета у Юрия Романенко впервые в условиях невесомости была записана продольная баллистокardiограмма. Эта запись показала существенные отличия БКГ комплексов по амплитуде и форме по сравнению с земной регистрацией. При этом использовался пьезоэлектрический датчик-акселе-

рометр. Датчик был разработан Институтом Прикладной Физики Академии Наук СССР. Чувствительность датчика была 3 мВ/см/с, диапазон частот был 0,3–2000 Гц, размер: 26х36х11 мм, вес 30 г. Датчик был помещен в блок размером 30х30х30 мм и фиксировался на теле космонавта с помощью резинового пояса и металлической пластины близко к центру масс в области подвздошной кости. Первые измерения были сделаны при свободном «парении» космонавта в условиях невесомости с вытянутыми вдоль тела ногами и руками. Регистрация сигналов проводилась с помощью дополнительного усилительного блока аппаратуры медицинского контроля «Полином-2М» [24].

### ОС «Салют-6», 4-ая экспедиция

Во время 4-й экспедиции в 185-суточном полете на орбитальной станции «Салют-6» повторная запись продольной баллистокardiограммы проводилась ежемесячно у двух членов экипажа. Использовался тот же датчик, что и в 1-й экспедиции. Протокол исследований включал запись при нормальном дыхании и при задержке дыхания [29]. Записи были сделаны на 46-й, 71-й, 98-й, 133-й и 175-й дни полета. Определялись амплитудно-временные значения сегментов II, IJ, JK, KL, MN. Сила сердечных сокращений вычислялась путем умножения величины сегмента IJ на массу тела космонавта в кг. Полученные значения в относительных единицах сравнивались с предполетными данными и показали их уменьшение в ходе полета. Самые большие значения силы сердечных сокращений у обоих космонавтов были отмечены на 133-й день полета, самые низкие значения на 175-й день. Были также отмечены существенные индивидуальные различия.

### ОС «Салют-6», советско-румынский полет

В мае 1981 года в совместном советско-румынском полете на орбитальной станции «Салют-6» была проведена регистрация БКГ в самом начальном периоде невесомости: на 3-й и 5-й дни полета [30]. Использовался тот же датчик, что и 1-й экспедиции. Космонавты проводили записи в покое, при задержках дыхания и после легкой

физической нагрузки. Были выявлены значительные индивидуальные различия между БКГ космонавтов.

### ОС «Салют-7», 1-ая экспедиция, 1982

Регистрация БКГ проводилась у двух членов экипажа в течение полета длительностью в 235 дней. Использовался новый БКГ-датчик с улучшенным соотношением сигнал-шум по сравнению с датчиком «Пульс». Чувствительность датчика — 20 мВ/м/с. Эксперименты были выполнены два раза до полета, ежемесячно во время полета и дважды после приземления. Продольная БКГ регистрировалась с области подвздошной кости в покое и при задержке дыхания. Были проанализированы изменения сегментов Н-I, I-J, J-K, K-L, и М-N. Величины измеренных сил колебались в пределах 1–3 N.

### ОС «Салют-7», 4-ая экспедиция, советско-индийский полет, 1984

В этом 8-дневном полете записи БКГ были получены у трех членов экипажа [31]. Использовался новый датчик с чувствительностью 20 мВ/м/с. Эксперименты были выполнены два раза перед полетом, два раза в полете (на 3-й и 5-й дни пребывания в условиях невесомости) и на 1-й и 4-й дни после полета. Протокол исследований включал регистрацию БКГ при разном положении датчика: на груди, между лопатками, на пояснице, на гребне подвздошной кости. Записи проводились при спокойном дыхании и при задержке дыхания. Опубликованы записи при положении датчика между лопатками [24,31]. При этом запись БКГ проводилась в трех положениях датчика: 1) голова-ноги (Foot to head); 2) слева-направо (Left to right); 3) спереди-назад (Ventro-dorsal). На рис. 2 представлены соотношения

амплитуд сегментов Н-I, I-J, J-K у трех членов экипажа (С1, С2, С3) в предполетном периоде, в полете и после полета.

Для этих трех космонавтов были также проанализированы изменения амплитуд Н-I, I-J, J-K, K-L, и М-N сегментов БКГ в диапазонах частот 0–4 Гц, 4–10 Гц и 10–20 Гц (эпоха анализа — 16 секунд). Полученные результаты подтверждают гипотезу об относительно большей амплитуде сигналов в дорзентральном и боковом направлениях. Индивидуальные различия, можно оценить по записям в продольном направлении, которые в ходе полета были неизменными у одного космонавта, увеличились у другого и уменьшились у третьего (рис. 2).

### ОС «Мир», 2-ая экспедиция

В этом полете впервые проводилась комплексная регистрация продольной БКГ (по оси голова-ноги) совместно

Табл. 1. Сейсмокардиография и баллистокардиография в космических полетах.

Этапы	Общая характеристика этапа	Орбитальные станции и экспедиции	Годы выполнения исследований
1	Регистрация СКГ в системе медицинского контроля	Космические корабли «Восток-5, 6» «Союз-ТМ»	1963 1967–1987
2	Первые БКГ исследования в коротких и длительных полетах	ОС «Салют-6» Экспедиция 1 Экспедиция 4 Экспедиция 6	1977 1979 1981
3	Осуществление регулярных ежемесячных БКГ исследований в длительном полете, первая запись БКГ по трем осям	ОС «Салют-7» Экспедиция 1 Экспедиция 4	1982 1984
4	Комплексное кардиологическое исследование с применением баллистокардиографии	ОС «Мир» Экспедиция 2	1988
5	Пространственная баллистокардиография в длительном полете с измерением силы сердечных сокращений	ОС «Мир» Экспедиция 6	1990
6	Совместная регистрация БКГ и СКГ в 14-месячном космическом полете	ОС «Мир» Экспедиции 15–17	1993–1995
7	Регистрация СКГ в составе эксперимента «Пневмокард»	МКС Экспедиции 14–30	2007–2012
8	Регистрация пространственной БКГ по 6 осям совместно с ЭКГ, СКГ, дыханием и импедансной кардиограммой	МКС	2013–2014*

\* В 2013–2014 г.г. на МКС планируется выполнение научного эксперимента «Кардиовектор».

с кинетокардиограммой и сейсмокардиограммой. Это дало возможность наряду с показателями баллистокардиограммы определить много различных кардиологических показателей: длительность фаз сердечного цикла, расчетные значения ударного и минутного объема кровообращения, скорость сердечного выброса. Исследование проводилось у трех космонавтов: у одного в течение 296-суточного полета и у двоих – в течение 97–100 суток полета. Было установлено, что рост амплитуды БКГ в полете коррелирует с увеличением ударного объема и с увеличением общей работы сердца (по амплитуде первого цикла сейсмокардиограммы). Показано, что на 97–100-е сутки полета у всех космонавтов существенно увеличивается амплитуда 1-го цикла СКГ, что совпадает с ростом амплитуды БКГ-комплексов. В длительном полете общая (СКГ)

и внешняя (БКГ) работа сердца коррелируют со скоростью сердечного выброса (рис. 3).

Сравнение изменений амплитуд отдельных волн и сегментов БКГ на разных этапах космического полета показало, что процесс адаптации сердца к условиям длительной невесомости очень сложен. Так, у всех троих космонавтов наблюдалась однотипная картина снижения амплитуды HI, II и JK на 12-е сутки полета и их рост на 97–100-й день, но степень этих изменений была индивидуальной.

### ОС «Мир», 6-ая экспедиция

В этом 179-ти суточном полете регистрация БКГ проводилась у двух членов экипажа. 10 апреля 1990 года впервые была получена пространственная бал-

листокардиограмма с помощью датчика, состоящего из трех расположенных перпендикулярно друг к другу пьезоэлектрических акселерометров. Датчик пространственной БКГ представлял собой цилиндрический блок диаметром в 40 мм и высотой в 20 мм. Чувствительность датчика была 35 мВ/см/с; диапазон частот: 0,25–75 Гц; вес – 40 г (рис. 4 справа). Датчик размещался между лопатками и фиксировался с помощью металлической пластины и резинового пояса. Дополнительно к трехмерной пространственной баллистокардиограмме регистрировались ЭКГ и СКГ (рис. 4 в центре). Специальный усилительный БКГ-блок (рис. 4 слева) был связан с бортовой аппаратурой «Гамма» и данные передавались на Землю по телеметрии.

Эксперименты с записью пространственной БКГ были выполнены в полете дважды на 56-й и 110-й дни полета.

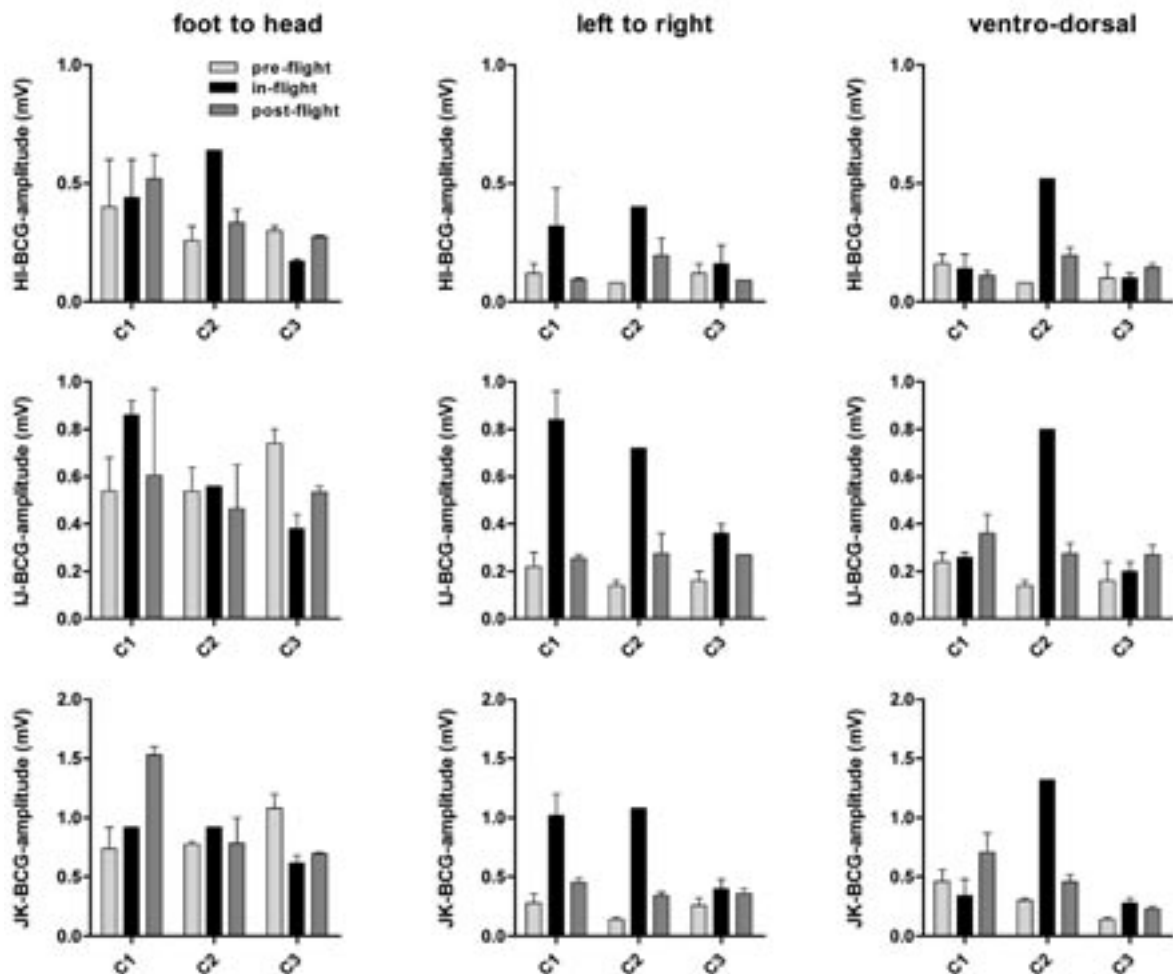


Рис. 2. Средняя амплитуда систолических сегментов БКГ HI (вверху), II (в середине) и JK (внизу) при регистрации по трем осям у трех членов советско-индийского экипажа на орбитальной станции «Салют-7» до полета, в полете и после космического полета.

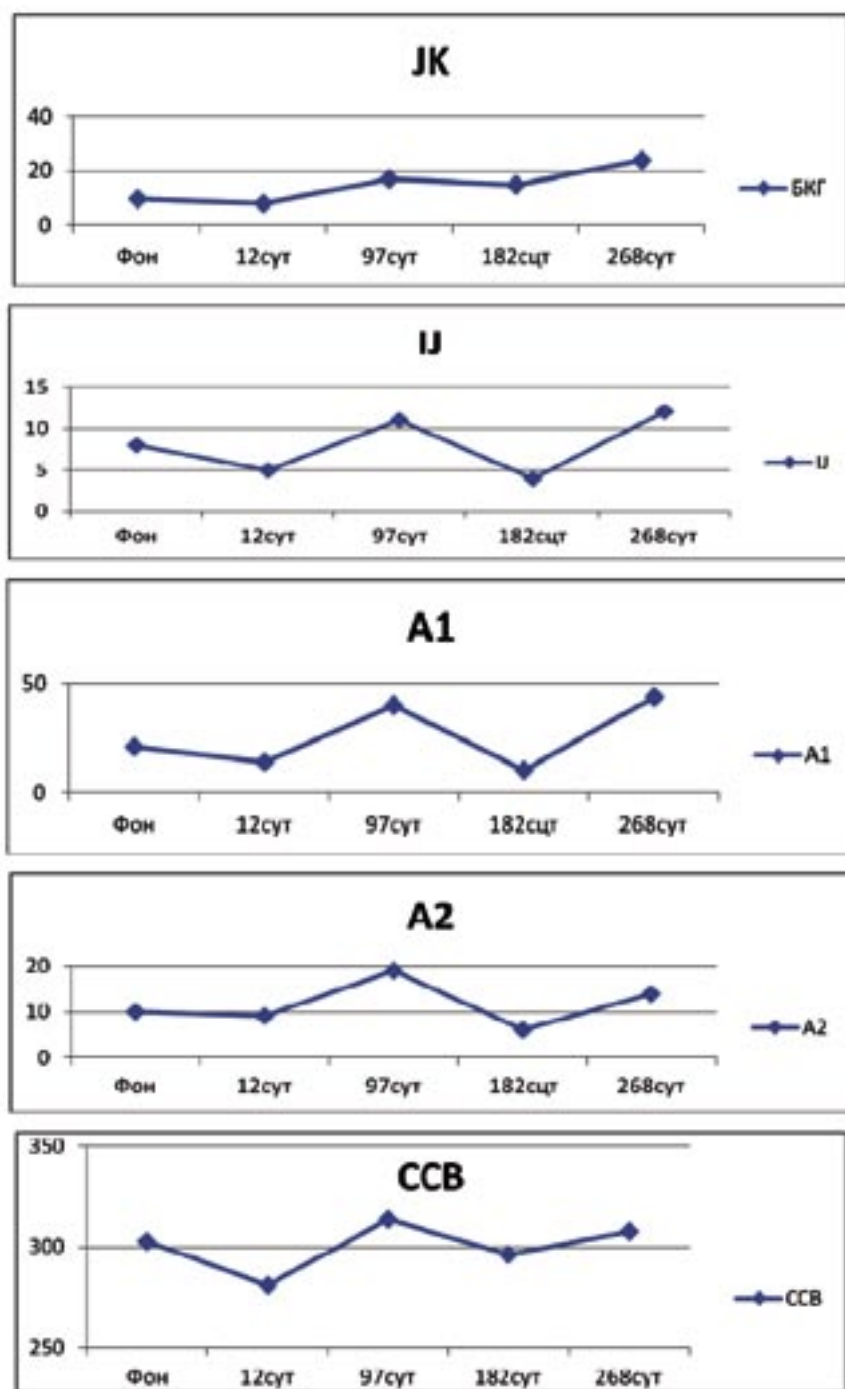


Рис. 3. Средние значения амплитуд JK и IJ БКГ и A1-A2 СКГ и скорость сердечного выброса (ССВ) в 296-суточном космическом полете во 2-й экспедиции на ОС «Мир» (1988).

Протокол записи включал регистрацию данных в покое и при задержках дыхания. Результаты этих исследований до сих пор не были опубликованы и в данной статье представляются впервые. На рис. 5 представлены образцы записи пространственной баллистокardiограммы на вдохе-выдохе, полученные у командира экипажа на 56-й день

полета. Значения ускорения и силы на 56-й и 110-й дни полета, вычисленные по максимальному сегменту I-J в трех различных направлениях при задержке дыхания на выдохе представлены на рис. 6. На 56-й день полета у второго космонавта наибольшая величина ускорения отмечалась в направлении «голова-ноги», в то время как у второго

космонавта самое большое ускорение наблюдалось в боковом направлении. Соответственно, суммарный вектор силы был равен 5,85 N и 10,18 N. Эта картина изменилась на 110 сутки полета. У первого космонавта величины ускорения и силы увеличились до 7,26 N. У второго космонавта наибольшей стала величина силы и ускорения в направлении «голова-ноги», а в боковом направлении сила несколько уменьшилась (до 9,41 N).

На 110-е сутки полета не было обнаружено существенных изменений величины суммарного вектора сил. Возможные объяснения изменений в форме и амплитуде записей, особенно в боковом и дорзо-вентральном направлениях, могут быть связаны с межжелудочковым взаимодействием или с изменениями механической оси сердца. В эти изменения может так же вносить свой вклад задержка во времени открытия и закрытия легочных и аортальных клапанов, что ведет к различиям в изоволюметрическом сокращении и времени изгнания левого и правого желудочков. Кроме того, изменения объема крови в невесомости может изменить венозное заполнение сердца так же, как изменить положение брюшных органов и диафрагмы. Это может изменить угол между направлением выброса крови левым желудочком и восходящей аортой, что может привести к преобладанию импульсов в боковом и дорзо-вентральном направлениях. Еще одно из возможных объяснений наблюдавшихся изменений может заключаться в различии сократительной активности правого и левого желудочков. Если предположить, что активность правого желудочка проявляется преимущественно в латеральном направлении, то более высокая амплитуда БКГ на 56-е сутки полета у второго космонавта может быть связана с еще недостаточной разгрузкой малого круга кровообращения в результате перемещения масс крови в верхнюю часть тела на первых этапах адаптации к невесомости. На 110-й день полета у космонавтов уже не наблюдается такой разницы в амплитудах БКГ по латеральной оси. Однако, следует отметить, что при этом заметно изменилась форма БКГ-комплексов. Так, у второго космонавта эти изменения достигали 2-степени по шкале Брауна [42].

### ОС «МИР», 14-месячный космический полет

В рамках Российско-Австрийской космической программы БКГ и СКГ ре-





**Рис. 4.** Космический эксперимент «Вектор». Дополнительный блок к аппаратуре «Гамма» (слева), нагрудный пояс с электродами для ЭКГ и датчиком СКГ (в центре), трехмерный акселерометрический датчик для регистрации пространственной БКГ (справа).



**Рис. 5.** Образцы записи пространственной баллистокардиограммы на вдохе и выдохе при выполнении космического эксперимента «Вектор» командиром экипажа 6-й экспедиции на орбитальной станции «Мир» на 56-й день полета 10 апреля 1990 г.

гистрировались во время научного эксперимента «Пульстранс». Он был проведен в 4-х длительных полугодовых экспедициях и в самом продолжительном 14-и месячном космическом полете врача-космонавта Валерия Полякова. При анализе динамики изменения амплитуд баллисто- и сейсмокардиограммы в 14-месячном космическом полете [33]. было отмечено, что уже со 2-го месяца полета амплитуда БКГ увеличилась почти вдвое. Это может быть связано следующими обстоятельствами: 1) уменьшением объема циркулирующей крови, 2) ростом давления в малом круге кровообращения, 3) исчезновением гравитационного компонента кровообращения. Все эти причины ведут

к увеличению скорости (и ускорения) изгнания крови желудочками (росту кинетической энергии сердечного выброса) [30]. Поскольку рост внешней работы сердца происходит без изменения его общей работы, то можно говорить о повышении коэффициента полезного действия (КПД) сердца как генератора энергии. Резкий рост внешней работы сердца на 250-е сутки полета совпадает с максимумом активности симпатического отдела вегетативной нервной системы (ростом индекса напряжения регуляторных систем) и максимумом активности вазомоторного центра. Вполне резонно поэтому считать рост внешней работы сердца инотропным эффектом увеличения симпатического

тонуса. При этом можно говорить и о повышении эффективности сердечных сокращений (рост КПД сердца).

Иную картину демонстрирует динамика изменений амплитуды СКГ. Во время полета изменения амплитуды СКГ выражены очень незначительно. Только, начиная с 11-го месяца, амплитуда СКГ растет, и к концу полета она вдвое превышает предполетный уровень. Однако максимальной величины амплитуда СКГ достигает после приземления. На 3-и сутки после возвращения на Землю амплитуда СКГ в 70 раз превышает исходные значения. Поскольку при этом амплитуда БКГ не только не растет, но и падает, можно говорить о резком снижении эффективности (КПД) работы сердца.

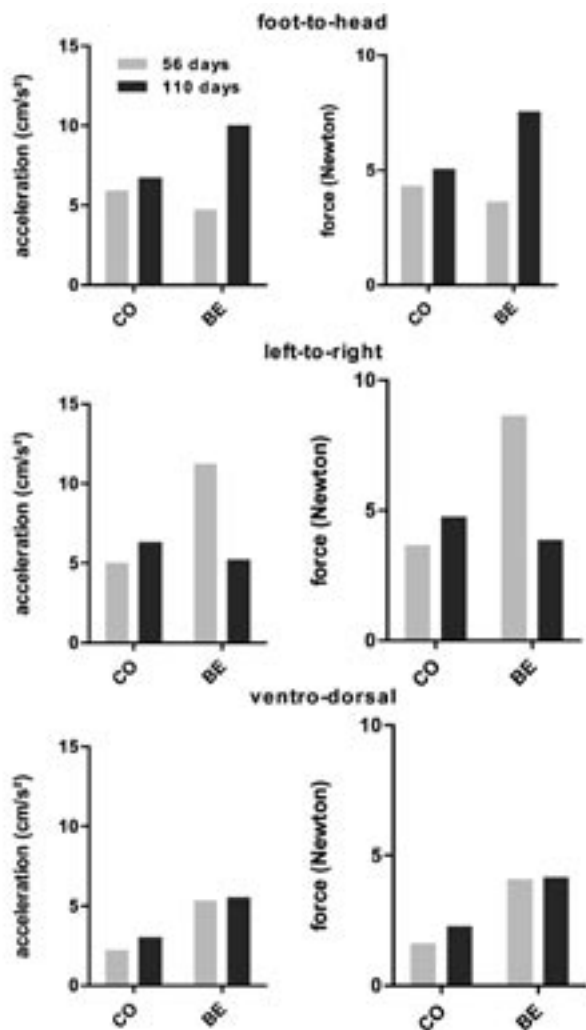


Рис. 6. Космический эксперимент «Вектор» (6-ая экспедиция на ОС «Мир» (1990 г.). Изменения ускорений (acceleration) и силы (force) сердечных сокращений на разных этапах космического полета (56-й и 110-й дни полета) у командира экипажа (CO) и бортинженера (BE) по данным пространственной баллистокардиографии.

## Регистрация сейсмокардиограммы и баллистокардиограммы во время сна

Следующий шаг в области исследования сократительной функции сердца в условиях невесомости связан с регистрацией СКГ и БКГ во время сна [37]. Речь идет о научных экспериментах «Ночь» и «Сонокард», выполненных со-

ответственно на ОС «Мир» (1992–1995) и на Международной Космической Станции (2007–2012).

Для регистрации баллистокардиограммы во время сна на ОС «Мир» была разработана оригинальная технология с использованием датчика-акселерометра, закрепленного на спальном мешке космонавта. Микроколебания тела, связанные с работой сердца и дыханием, в течение всей ночи регистрировались датчиком и передавались в бортовой компьютер. На МКС была использована другая технология исследований. Датчик-акселерометр был смонтирован в миниатюрный прибор размером с пачку сигарет. Этот прибор на время сна размещался в кармане футболки космонавта. Данные записывались в блок памяти, кото-

рый находился в приборе, и утром переписывались на бортовой компьютер. Результаты обоих этих экспериментов использовались для изучения вегетативной регуляции кровообращения по данным анализа variability сердечного ритма [38, 39, 40]. С помощью специальных программ, вычисляющих длительности кардиоинтервалов путем распознавания характерных точек на СКГ и БКГ, строились динамические ряды кардиоинтервалов.

## Обсуждение

Представленный выше обзор проведенных в России баллистокардиографических и сейсмокардиографических исследований показывает, что за 35 лет, прошедших со времени записи первой баллистокардиограммы в условиях невесомости накопилось много вопросов, на которые все еще нет ответов. Как известно, метод баллистокардиографии позволяет получать информацию о силе сердечных сокращений, о сократительной активности левых и правых отделов сердца и о координированности их сокращений. Сила сердечных сокращений в условиях невесомости была достаточно точно измерена только в начале 90-х годов в 6-й экспедиции на ОС «Мир» при одновременной регистрации баллистокардиограммы по трем осям. Суммарная сила сердечных сокращений оказалась равной 5–10 Ньютонам. Что касается возможности отдельной оценки сократительной активности правых и левых отделов сердца, то этот вопрос требует еще дальнейших исследований.

Важной особенностью баллистокардиографии является возможность оценки координированности сердечных сокращений. Речь идет о согласованности работы правых и левых отделов сердца, что крайне важно в клинической практике. Обычно оценка этого важного показателя сердечной деятельности осуществляется по косвенным признакам на основе данных аускультации, рентгенокимографии, ультразвуковых методов. Баллистокардиография дает возможность непосредственно и наглядно судить о координированности сердечных сокращений по форме получаемой записи. В 50-е годы весьма популярной была оценка баллистокардиограммы по классификации Брауна [4]. Различают 4 степени отклонений по шкале Брауна. Эти степени отража-



ют нарушение координированности и силы сердечных сокращений по изменениям формы БКГ-комплексов. Так, 2-я степень отклонений указывает на наличие вымещенных дыхательных изменений амплитуды и формы кривой. При 3-й степени главным было нарушение формы записи, указывающее на дискоординацию сокращений левых и правых отделов сердца. При 4-й степени отклонений (уменьшение амплитуды и нарушение формы комплексов) можно говорить о серьезных нарушениях сократительной функции, которые встречаются в случаях инфаркта миокарда, декомпенсированных пороках сердца, выраженном атеросклерозе. Но и у практически здоровых людей, особенно в пожилом возрасте, нередко встречаются БКГ с 3-й и 4-й степенью отклонения, что является основанием для проведения дополнительного тщательного клинического обследования. В монографии В. Дока и братьев Мандельбаум рассматривается вопрос о массовых профилактических обследованиях с использованием баллистокардиографии [42]. В частности, этот принцип с использованием методов СКГ и БКГ был реализован в системе массовой диспансеризации в СССР в конце 80-х годов [41].

Вопрос о дифференциальной оценке работы левых и правых отделов сердца по данным пространственной баллистокардиографии может быть успешно решен лишь в результате исследований в условиях невесомости, где отсутствуют силы торможения и демпфирования, которые существенно искажают результаты измерений на Земле. Здесь, по-видимому, требуются построение биомеханических геометрических моделей и серьезные математические расчеты. Для идентификации осей перемещения тела в пространстве в связи с активностью левого или правого желудочка необходимы будут специальные лабораторные эксперименты и подбор определенных групп больных с преобладанием активности соответствующих отделов миокарда.

Существует еще одно полезное направление использования метода баллистокардиографии, которое получило развитие в космической медицине. Речь идет об исследованиях во время сна [37]. Эксперименты «Ночь» (на орбитальной станции «Мир») и «Сонокард» (на МКС) продемонстрировали возможность и перспективность создания бесконтактных систем для контроля функционального состояния человека во время сна [37]. Такие системы могут получить широкое распространение, как в клинической

практике, так и в различных областях профилактической медицины и прикладной физиологии.

## Перспективы

Скоро эксперименты с записью пространственной БКГ начнутся на Международной Космической Станции. Однако сейсмокардиография и баллистокардиография уже использовались в различных советских и российских космических экспериментах для изучения сердечно-сосудистой системы и совершенствования контроля здоровья экипажа. Так, в эксперименте «Сонокард» сейсмокардиограмма использовалась для оценки вариабельности сердечного ритма, дыхания и двигательной активности во время сна с помощью простого сейсмодатчика, расположенного в нагрудном кармане [37]. Эти эксперименты продолжили первые исследования баллистокардиограммы во время сна, начатые во время Российско-Австрийских полетов и в 14-месячном полете В. В. Полякова на станции «Мир» [33]. В эксперименте «Пневмокард» комбинация ЭКГ, СКГ, дыхания и импедансной кардиограммы использовалась во время дыхательных тестов [34].

Следующим шагом развития эксперимента «Пневмокард» (2013–2014 г. г.) планируется использовать его для записи БКГ по 6 осям в дополнение к существующим каналам ЭКГ, дыхания и импедансной кардиограммы. При этом планируется проводить запись по трем линейным осям и трем осям вращения. На основе опыта продольной баллистокардиографии, и особенно пространственной баллистокардиографии в параболических полетах [35] и в космическом полете [21, 31, 32, 36] становится ясным, что один лишь продольный компонент баллистокардиограммы может вводить в заблуждение при вычислении силы сердечных сокращений. БКГ в двух других направлениях может показывать даже более значительные амплитуды записи, чем в направлении «голова–ноги». Это показывает, что только векторный анализ всех компонентов БКГ может дать достаточно полное представление о генерации баллистических сил сердца и их передаче в виде движений тела.

Кроме того, нам кажется существенным использовать новые алгоритмы обработки данных, чтобы достигнуть

записи более устойчивых БКГ комплексов для дальнейшего анализа и пролить новый свет на соотношения между расчетными параметрами БКГ анализа, такими как смещения тела, сила или работа, а также показателями сердечно-сосудистой и дыхательной системы.

Конечная цель планируемых баллистокардиографических исследований в невесомости состоит в обеспечении контроля за энергетикой сердечной деятельности и в прогнозировании возможных гемодинамических нарушений на разных этапах длительного космического полета. Энергетический аспект баллистокардиографических исследований относится лишь к оценке работы сердечного насоса по перемещению крови в сосудистой системе. Вопрос о механизмах формирования энергетических запасов миокарда и определении его функционального резерва относится к области молекулярно-клеточной физиологии и биохимии. Однако баллистокардиография и сейсмокардиография должны помочь в построении биофизических моделей преобразования общей работы сердца в его внешнюю работу. Должна быть решена задача оценки величин рабочих нагрузок для левого и правого желудочков, что крайне важно для контроля за процессами адаптации системы кровообращения к условиям невесомости, для определения степени нагрузки малого круга кровообращения. В условиях невесомости, по-видимому, складывается иная, чем на Земле координация работы между различными отделами сердца и новые внутрисистемные гемодинамические соотношения. Однако в условиях космического полета мы до сих пор пользуемся земными критериями оценки сердечной деятельности. Планируемый на МКС космический эксперимент «Кардиовектор» позволит дополнить ранее накопленный в ходе эксперимента «Пневмокард» обширный материал новыми недостающими знаниями. На рис. 7 и 8 представлены фрагмент баллистокардиографического исследования с помощью прибора «Кардиовектор» и пример формирования фазовых портретов пространственной баллистокардиограммы по трем линейным осям. Пространственная баллистокардиография вместе с другими кардиологическими методиками позволит построить биомеханические и биофизические модели кровообращения в космосе и поставить медицинский контроль за состоянием здоровья космонавтов на прочный научный фундамент.



Рис. 7. Образец записи комплекса кардиологических параметров с помощью бортового прибора «Кардиовектор» (сверху-вниз: ЭКГ — электрокардиограмма, ИКГ и ИПГ-1П — импедансная кардиограмма и ее первая производная, БКГ X, Y, Z — пространственная баллистокардиограмма по трем линейным осям X, Y, Z; СКГ — сейсмокардиограмма, ПТГ — пневмотахограмма).

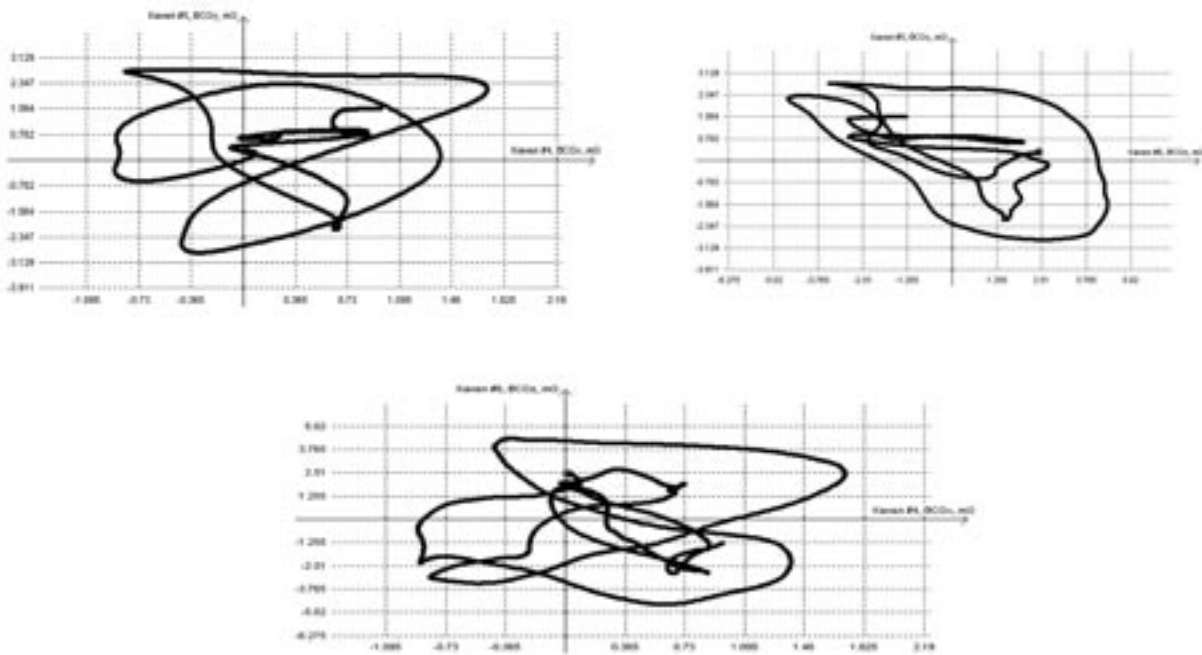


Рис. 8. Фазовые портреты пространственной баллистокардиограммы по трем линейным осям. (Плоскости X-Y, X-Z и Z-Y).

## Заключение

Развитие баллистокardiографии и сейсмокардиографии в рамках Российской космической медицины было связано с успехами пилотируемой космонавтики. Понимание важности изучения реакций сердечно-сосудистой системы в условиях космического полета привело к формированию нового специального научного направления – космической кардиологии. Еще в 1967 году была опубликована монография «Космическая кардиология» [24], в которой не только были обобщены известные в то время данные, но и были намечены перспективы дальнейшего развития этого важного научно-практического направления. Большое внимание уделялось развитию кардиологических методов, в частности методов исследования процессов вегетативной регуляции кровообращения и изучения сократительной функции сердца. Что касается вегетативной регуляции, то уже в первых пилотируемых полетах был использован метод анализа вариабельности сердечного ритма, который в течение первого десятилетия получил широкое применение в СССР в клинической и профилактической медицине, а, начиная с 80-х годов, получил распространение во всем мире и в настоящее время является одним из наиболее популярных кардиологических методов [38, 39, 40]. Для изучения сократительной функции сердца в первых полетах использовался метод сейсмокардиографии, который длительное время входил в состав методов медицинского контроля при выводе космического корабля на орбиту и во время спуска. Более информативный метод баллистокardiографии впервые был испытан на орбитальной станции «Салют-6» в 1977 году, как только на орбите появилась возможность записи микроперемещений свободно «плавающего» в невесомости тела. В конце 70-х и в 80-е годы в космосе баллистокardiографические исследования были проведены в 6 экспедициях и, наконец, в начале 1990 года в длительном космическом полете была впервые получена запись пространственной баллистокardiограммы.

Сейчас, более чем 20 лет спустя, Российская космонавтика планирует проведение аналогичного научного эксперимента «Кардиовектор», который будет не только отличаться значительно более высоким научно-техническим уровнем, но и более серьезными и сложными задачами. Если

раньше речь шла лишь о первых измерениях силы сердечных сокращений в условиях длительной невесомости, то теперь ставится задача создания принципиально нового прибора для всестороннего исследования реакций системы кровообращения в космосе. Регистрация пространственной баллистокardiограммы по 6 осям с одновременной записью электрокардиограммы, импедансной кардиограммы и сейсмокардиограммы позволит не только получать информацию о значительном числе кардиологических показателей, но и построить биомеханические и биофизические модели сердечной деятельности на разных этапах космического полета для решения практических задач медицинского контроля и прогнозирования.

За прошедшие годы в области космической кардиологии был накоплен огромный опыт, который будет использоваться при анализе результатов эксперимента «Кардиовектор». Прежде всего, надо отметить, что новый прибор строится на базе приборов «Пульс» и «Пневмокард», которые в течение 10 лет использовались на МКС. В полугодовых полетах было обследовано около 40 членов экипажей и все полученные материалы станут частью будущей базы данных. Эти же приборы использовались во многих наземных модельных экспериментах (длительная изоляция, «сухая» иммерсия, АНОГ, ОДНТ). Наконец, имеется большой опыт применения этих приборов при обследовании практически здоровых людей (летчики, водители автобусов, добровольцы-испытатели в разных по экологии регионах мира). И еще важно упомянуть опыт использования методов БКГ и СКГ для проведения научных исследований во время сна в условиях невесомости. Это эксперименты «Ночь» на ОС «Мир» (1992–1995 г.г.) и «Сонокард» на МКС (2007–2012 г.г.). Таким образом речь идет о подготовке нового космического эксперимента «Кардиовектор», интегрирующего 20-летний опыт развития Российской космической кардиологии и области баллистокardiографии.

### Литература

1. National Aeronautics and Space Administration and Federal Aviation Agency. *Ballistocardiography. A Bibliography. NASA SP-7021 (FAA AM 65-15)*. 1965;1–49.
2. Баевский Р.М. Метод баллистокardiографии возможности его применения. *Воен-мед. журн.* 1958;5:37–41.
3. Baevsky R. M., Bogoyavlensky E. N., Popenchenko V. V. Prognostic impor-

4. Parin V. V., Baevsky R. M., Talakov A. A. Prognostic importance of ballistocardiography and other mechanocardiographic methods. *Bibl Cardiol.* 1973;0:245–248.
5. Парин В. В., Козырева Е. А. Прогнозирование в здравоохранении и медицине. *Здравоохранение Российской Федерации.* 1971;15:3–6.
6. Парин В. В., Баевский Р. М. Некоторые аспекты изучения регуляторных процессов висцеральных систем организма человека. *Клинич. мед.* 1970;48:26–29.
7. Баевский Р. М. Основы практической баллистокardiографии. М., Медгиз. 1962, 156 с.
8. Баевский Р. М. Возможности применения баллистокardiографии при медицинских обследованиях летчиков. *Воен. мед. журн.* 1958;86:48–51.
9. Баевский Р. М. Проблемы практической баллистокardiографии. *Клин. мед.* 1958;36:93–98.
10. Григорьев А. И., Баевский Р. М., Галеева Н. Ю. Сейсмокардиография и баллистокardiография. В кн: «Василий Васильевич Парин и его роль в развитии космической медицины и физиологии». М., Фирма «Слово», 2004, 39–45.
11. Rubenstein E. A review of clinical ballistocardiography. *N Engl J Med.* 1952;247:166–173.
12. Annotation. *Ballistocardiography. Br Med J.* 1956;2:761.
13. Noordergraaf A., Horeman H. W. The prediction of the Ballistocardiogram from physiological and anatomical data. *Cardiologia.* 1957;31:416–420.
14. Noordergraaf A., Heynekamp C. E. Genesis of displacement of the human longitudinal ballistocardiogram from the changing blood distribution. *Am J Cardiol.* 1958;2:748–756.
15. Noordergraaf A. Physical aspects of the «direct» recording of body displacement, velocity, and acceleration by shinbar ballistocardiographs. *Circulation.* 1961;23:426–433.
16. Gilaberte S., Gomez-Clapers J., Casanella R., Pallas-Areny R. Heart and respiratory rate detection on a bathroom scale based on the ballistocardiogram and the continuous wavelet transform. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:2557–2560.
17. Kortelainen J. M., Mendez M. O., Bianchi A. M., Matteucci M., Cerutti S. Sleep staging based on signals acquired through bed sensor. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2010;14:776–785.
18. Migliorini M., Bianchi A. M., Nistico D., Kortelainen J., rce-Santana E., Cerutti S., Mendez M. O. Automatic sleep staging based on ballistocardiographic signals recorded through bed sensors. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2010;2010:3273–3276.
19. De Ridder S., Migeotte P. F., Neyt X., Pattyn N., Prisk G. K. Three-dimensional ballistocardiography in micro-

- gravity: A review of past research. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2011;2011:4267–4270.
20. Giovangrandi L., Inan O. T., Wiard R. M., Etemadi M., Kovacs G. T. Ballistocardiography — A method worth revisiting. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2011;2011:4279–4282.
  21. Shin J. H., Hwang S. H., Chang M. H., Park K. S. Heart rate variability analysis using a ballistocardiogram during Valsalva manoeuvre and post exercise. Physiol Meas. 2011;32:1239–1264.
  22. Wiard R. M., Inan O. T., Argyres B., Etemadi M., Kovacs G. T., Giovangrandi L. Automatic detection of motion artifacts in the ballistocardiogram measured on a modified bathroom scale. Med Biol Eng Comput. 2011;49:213–220.
  23. Scarborough W. R., Westura E. E., Podolak E. Studies on a small group of normal test pilots with special reference to quantitative relationships of age with the ULF ballistocardiogram and other cardiovascular measurements. Bibl Cardiol. 1969;24:66–74.
  24. Парин В. В., Баевский Р. М., Волков Ю. Н., Газенко О. Г. Космическая кардиология. — Л.: Медицина, 1967. 206 с.
  25. Parin V. V., Baevsky R. M., Gazenko O. G. Heart and circulation under space conditions. Cor Vasa. 1965;32:165–184.
  26. Baevskii R. M., Volkov Y. N. Clinicophysiological evaluation of seismocardiographic data obtained during space flights of Vostok V and Vostok VI. Fed Proc Transl Suppl. 1965;24:953–956.
  27. Mandelbaum R. A., Mandelbaum H. The clinical significance of the lateral plane ballistocardiogram. N Y State J Med. 1957;57:1409–1414.
  28. March H. W. Three-plane ballistocardiography: the effect of age on the longitudinal, lateral, and dorsoventral ballistocardiograms. Circulation. 1955;12:869–882.
  29. Баевский Р. М., Фунтова И. И. Баллистокардиографические исследования во время 1-й экспедиции на орбитальной станции «Салют-6» Косм. биол. и авиакосм. мед. 1982;16:34–37.
  30. Baevskii R. M., Funtova I. I., Groza P. P. Results of ballistocardiographic studies during 12-hour cosmic flights. Physiologie. 1984;21:133–138.
  31. Баевский Р. М., Чатарджи П. С., Фунтова И. И., Закатов М. Д. Сократительная функция сердца в условиях невесомости по результатам 3-х мерной баллистокардиографии. Косм. биол. и авиакосм. мед. 1987;21:26–31.
  32. Scano A., Rispoli E., Strollo F., Cama G., Guidetti L., Brazzoduro G. Three dimensional ballistocardiography in weightlessness (experiment 1ES-028). Life Sciences Research in Space; 1984.
  33. Баевский Р. М., Поляков В. В., Мозер М. и др. Адаптация кровообращения к условиям длительной невесомости: баллистокардиографические исследования во время 14-месячного космического полета. Авиакосм. и эколог. мед. 1998;32:23–30.
  34. 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;103:156–161.
  35. Hixson W. C., Beischer D. E. Biotelemetry of the triaxial ballistocardiogram and electrocardiogram in a weightless environment/ Monogr No. 10. Res Rep U S Nav Sch Aviat Med. 1964;1–112.
  36. Prisk G. K., Verhaeghe S., Padeken D., Hamacher H., Paiva M. Three-dimensional ballistocardiography and respiratory motion in sustained microgravity. Aviat Space Environ Med. 2001;72:1067–1074.
  37. Баевский Р. М., Богомолов В. В., Фунтова И. И., Слепченкова И. Н., Черникова А. Г. Перспективы развития системы медицинского контроля в длительном космическом полете на основе бесконтактной регистрации физиологических функций во время сна. Авиакосмическая и экологическая медицина, 2009, 3, с. 34–40.
  38. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use // Circulation. — 1996. — Vol. 93. — P. 1043–1065.
  39. Баевский Р. М., Иванов Г. Г., Чирейкин Л. В. и др. Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем. Вестник аритмологии, 2001, 24, с. 69–85.
  40. 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, AA-D-11-00046R1.
  41. Адамович Б. А., Баевский Р. М., Берсенева А. П. и др., Проблема автоматизированной оценки функционального состояния организма в космонавтике и профилактической медицине на современном этапе. Космическая биология и авиакосмическая медицина 1990, N 4, с.11–19.
  42. Dock W., Mandelbaum R., Mandelbaum H. Ballistocardiography. N-Y, 1954, 246 p.

### The use of seismo- and ballistocardiography in russian aviation and spacemedicine. A short historical review

R. M. Baevsky<sup>1</sup>, I. I. Funtova<sup>1</sup>, J. Tank<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Institute of biomedical problems of the Russian Academy of Science Moscow, Russia  
<sup>2</sup>Hannover Medical School, Hannover Germany

#### Abstract

Non invasive techniques to monitor cardiovascular function like mechanocar-

diographic techniques are very popular in Russia and have a long lasting history. They have been used extensively in occupational-, sports-, aviation- and space medicine for more than 60 years now. The first seismocardiograms (SCG) in space were recorded in animals during the third sputnik mission in December, 1960. SCG was recorded in humans during the Vostok-5 and Vostok-6 missions in 1963. The first ballistocardiogram (BCG) in space has been registered by the crew-commander Yuri Romanenko during the first expedition on orbital station «Salyut-6» in 1977. Longitudinal BCG during the initial phase of weightlessness (1981, joint Soviet-Romanian mission), during long term space flight (4th mission, 183 days), and sequential triaxial-BCG in space (1984, joint Soviet-Indian mission) were recorded onboard the orbital stations Salyut-6 and Salyut-7. The flight experiment «Vektor» using SCG and real 3D-BCG measurements was carried out in 1990 onboard the MIR space station (6th expedition). SCG and BCG were also used during the longest human space flight over 14 months including the first recordings during sleep (15th-17th expeditions). The flight-experiment «Cardiovector» will start onboard the International Space Station in 2013-2014 including BCG with 6 degrees of freedom. This approach will allow the use of new data processing and data analysis techniques in order to better understand the complex interaction between «cardiac forces», acceleration and displacement vectors, and hemodynamic parameters, which can not be studied under gravity conditions. This information can be used for crew health monitoring and for assessing individual cardiovascular adaptation to long term weightlessness.

**Key words:** seismocardiography, ballistocardiography, spacemedicine, cardiovascular physiology, health monitoring, weightlessness.

### Баллістокардіографія і сейсмокардіографія в російській космічній медицині.

#### Короткий історичний огляд

R. M. Baevskii<sup>1</sup>, I. I. Funtova<sup>1</sup>, J. Tank<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Інститут медико-біологічних проблем РАН, Москва, Росія  
<sup>2</sup>Висша медична школа, Ганновер Німеччина

#### Резюме

У цій статті представлено короткий огляд застосування методів баллістокардіографії і сейсмокардіографії в космічній медицині. При цьому використані, головним чином, результати досліджень, виконаних у Росії. Неінвазивні методи вивчення серцево-судинної системи, такі як механокардіографія, були дуже популярні в Росії і мають велику історію. Вони

широко застосовувалися в професійній, спортивній, авіаційній і космічній медицині більше 60 років. Перша сейсмокардіограма (СКГ) в космосі була записана у тварин (собак) під час польоту третього штучного супутника землі в грудні 1960 року. СКГ запису при польоті людини були отримані під час польоту космічних кораблів «Восток-5» і «Восток-6» в 1963 році. Перша баллістокардіограма (БКГ) в космосі була зареєстрована у командира екіпажу орбітальної станції (ОС) «Салют-6» Юрія Романенка в 1977 році. На борту орбітальних станцій «Салют-6» і «Салют-7» записи поздовжніх БКГ були проведені в початковому періоді невагомості (1981, спільний Радянсько-Румунський політ) і в тривалому польоті (четвертий експедиція, 183 дні), а перша просторова БКГ (з послідовною реєстрацією по трьох осях) була отримана в 1984 році в спільному Радянсько-Індійському польоті. Бортовий експеримент «Вектор» із застосуванням СКГ і 3-х мірної просторової БКГ був проведений на борту орбітальної станції «Мир» (другий екс-

педиція, 1990 рік). На орбітальній станції «Мир» були також проведені дослідження БКГ в самому тривалому 14-місячному космічному польоті та дослідження БКГ в нічний період доби. У новому космічному експерименті «Кардіовектор» на Міжнародній космічній станції, який повинен початися в 2013-2014 р.р. буде проводитися запис БКГ по 6 осях (3 лінійних осі і 3 осі обертання). Цей підхід при використанні нових методів обробки та аналізу даних дозволить краще зрозуміти складну взаємодію між «серцевими силами» (прискоренням і векторами зсуву) та гемодинамічними параметрами, яке до цих пір не могло бути вивчено в умовах невагомості. Ця інформація може бути в майбутньому використана в цілях поліпшення медичного контролю членів екіпажу і для того, щоб оцінити індивідуальну серцево-судинну адаптацію до тривалої невагомості.

**Ключові слова:** баллістокардіографія, сейсмокардіографія, космічна медицина, моніторинг здоров'я, фізіологія кровообігу, невагомість.

## Переписка

д.м.н., професор **Р. М. Баевский**  
Институт медико-биологических проблем РАН  
Хорошевское шоссе, 76 А  
Москва, 123007, РФ  
тел.: +7 (499) 193-6244  
факс: +7(499) 195-2253  
эл. почта: rmb1928@mail.ru