



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ –
ИНСТИТУТ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ООО «Медицинские компьютерные системы»

МИР биологии и медицины

Методы и приборы
космической кардиологии
на борту Международной
космической станции

Монография

Под редакцией
д.м.н., проф. Р.М. Баевского,
академика РАН О.И. Орлова

ТЕХНОСФЕРА
Москва
2016

УДК 612.17 + 629.78

ББК 54.10 + 58

М54

Рецензенты:

Богомолов В.В. – доктор медицинских наук

Ардашев В.Н. – профессор, доктор медицинских наук

М54 Методы и приборы космической кардиологии на борту

Международной космической станции. Монография / [под ред. Р.М. Баевского, О.И. Орлова]. Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН. – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 368 с. ISBN 978-5-94836-462-9

Космическая кардиология как важный раздел космической медицины является постоянным источником инноваций, важных не только для космоса, но и для земной медицины и физиологии. Эту инновационную роль космической кардиологии можно проследить начиная с первых пилотируемых космических полетов, когда впервые были введены в практику методы анализа variability сердечного ритма, до сегодняшних полетов на МКС, где активно используются такие уникальные методы, как пространственная баллистокardiография и вероятностная оценка риска дезадаптации и нарушения здоровья. В предлагаемой коллективной монографии «Методы и приборы космической кардиологии на борту Международной космической станции (МКС)» представлены результаты развития этого нового научно-практического направления за последние 15 лет. Обобщаются работы, выполненные Институтом медико-биологических проблем РАН совместно с ООО «Медицинские компьютерные системы». Описываются как приборы, установленные на борту МКС, так и полученные с их помощью научные результаты. В заключении рассматриваются перспективы организации новых космических экспериментов на борту МКС.

Methods and devices in space cardiology on board the International Space Station: monograph / [editors R.M. Baevsky, O.I. Orlov]; State Research Center of Russian Federation – Institute of Biomedical Problems, Russian Academy of Sciences. – Moscow: TECHNOSPHERA, 2016. – 368 p.

Space cardiology as an important part of space medicine is a constant source of innovations, which are important not only for the space, but also for the Earth medicine and physiology. This innovative role of space cardiology can be traced back to the first manned space flights, when methods of heart rate variability analysis were introduced in the practice for the first time, to today's flights on the ISS, where are actively used such unique methods as spatial ballistocardiography and probabilistic assessment of health violations and adaptation risks. The proposed monograph "Methods and devices in space cardiology on board the International Space Station (ISS)" shows the results of the development of this new scientific and practical direction for the last 15 years. The work carried out by the Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences in cooperation with "Medical Computer Systems" is summarized. It describes the installed on board the ISS equipment, as well as obtained by their help scientific results. In conclusion we discuss the prospects of the organizing new space experiments aboard the ISS.

УДК 612.17 + 629.78

ББК 54.10 + 58

© 2016, Баевский Р.М. и др.

© 2016, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

При оформлении первой страницы обложки использована фотография с сайта www.spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttlests/134htmls/134e01013

ISBN 978-5-94836-462-9

Содержание

От редакторов.....	7
Предисловие.....	13
Глава 1. Исторический обзор <i>Р. М. Баевский, И. И. Фунтова</i>	18
Глава 2. Космическая кардиология как один из ведущих разделов космической медицины <i>Р. М. Баевский</i>	36
Глава 3. Некоторые новые методические подходы, получившие развитие в космической кардиологии	
3.1. Донозологическая диагностика <i>Р. М. Баевский, А. П. Берсенева</i>	49
3.1.1. Проблема оценки уровня здоровья.....	50
3.1.2. Основные принципы донозологической диагностики.....	52
3.1.3. Вопросы классификации донозологических состояний.....	55
3.1.4. Методология донозологической диагностики.....	57
3.1.5. Донозологическая диагностика как основа профилактической медицины будущего.....	64
3.2. Анализ variability сердечного ритма <i>Р. М. Баевский, А. Г. Черникова</i>	67
3.2.1. Физиологические основы анализа variability сердечного ритма.....	70
3.2.2. Основные методы анализа ВСР и оценка его результатов.....	74
3.2.3. Анализ ВСР в космической медицине.....	88
3.2.4. Роль анализа ВСР в развитии донозологической диагностики.....	101
3.2.5. Математическая модель функциональных состояний организма для вероятностной оценки адаптационного риска по данным анализа variability сердечного ритма.....	108
3.2.6. Типы вегетативной регуляции и устойчивость адаптационных реакций в условиях космических полетов.....	121
Заключение.....	128
3.3. Пространственная баллистокardiография <i>Р. М. Баевский, Е. С. Лучицкая, И. И. Фунтова</i>	129

Глава 4. Космический эксперимент «Пульс».**Исследование вегетативной регуляции кардиореспираторной системы в длительных космических полетах**

<i>Р. М. Баевский, И. И. Фунтова, А. Г. Черникова, Д. А. Прилуцкий</i>	149
Введение.....	149
4.1. Научная аппаратура.....	152
4.2. Методика анализа результатов эксперимента «Пульс».....	160
4.3. Научные результаты космического эксперимента «Пульс».....	163
Заключение.....	176

Глава 5. Космический эксперимент «Пневмокард».**Донозологический контроль здоровья космонавтов и изучение влияния факторов космического полета на вегетативную регуляцию кровообращения и сократительную функцию сердца в длительном космическом полете**

<i>И. И. Фунтова, Е. С. Луцицкая, А. Г. Черникова, Д. А. Прилуцкий, Ю. Н. Семенов, Й. Танк, Р. М. Баевский</i>	183
Введение.....	183
5.1. Научная аппаратура.....	188
5.2. Методы обработки и анализа данных.....	196
5.3. Результаты исследований.....	200
5.3.1. Процессы адаптации сердечно-сосудистой системы к условиям невесомости. Роль вегетативной регуляции.....	201
5.3.2. Донозологическая диагностика функционального состояния членов экипажа в длительном космическом полете. Оценка риска нарушений адаптации и развития патологии.....	207
5.3.3. Состояние центральной гемодинамики и сократительной функции сердца.....	221
5.3.4. Вариабельность сердечного ритма в оценке ортостатической устойчивости космонавтов.....	227
Заключение.....	237

Глава 6. Космический эксперимент «Сонокард».**Исследование физиологических функций организма бесконтактным методом во время сна в ходе длительного космического полета**

<i>И. И. Фунтова, Е. С. Луцицкая, И. Н. Слепченкова, А. Г. Черникова, Д. А. Прилуцкий, Р. М. Баевский</i>	239
Введение.....	239
6.1. Научная аппаратура.....	241

6.2. Методы обработки и анализа данных.....	245
6.3. Результаты исследований.....	249
6.3.1. Динамика средних значений комплекса физиологических показателей во время сна на разных этапах полета.....	249
6.3.2. Исследование индивидуальных особенностей вегетативного баланса.....	254
6.3.3. Оценка процессов восстановления функциональных резервов организма во время сна в условиях невесомости.....	256
6.3.4. Использование прибора «Сонокард» для оценки процессов восстановления после выполнения работ в открытом космосе.....	263
6.3.5. Оценка изменений функционального состояния космонавтов во время сна на основе метода математического моделирования.....	267
Заключение.....	271

Глава 7. Космический эксперимент «Кардиовектор».

Изучение влияния факторов космического полета на пространственное распределение энергии сердечных сокращений и роль правых и левых отделов сердца в приспособлении системы кровообращения к условиям длительной невесомости

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

<i>Д. А. Прилуцкий, Ю. Н. Семенов.....</i>	272
Введение.....	272
7.1. Схема проведения эксперимента и методика исследований.....	275
7.2. Методы обработки и анализа данных.....	278
7.3. Результаты исследований.....	282
7.3.1. Сила и энергия сердечных сокращений на разных этапах адаптации сердечно-сосудистой системы к условиям невесомости.....	282
7.3.2. Пространственная баллистокardiография в условиях длительной невесомости. Линейные и торсионные записи.....	286
7.3.3. Динамика амплитудно-временных показателей пространственной БКГ.....	288
7.3.4. Изменения баллистокardiограммы при тестах с задержкой дыхания на разных этапах космического полета.....	291

7.3.5. Оценка дыхательных изменений формы баллистокардиограммы на разных этапах длительного космического полета.....	293
7.3.6. Ротационная баллистокардиография.....	299
Заключение.....	300
Глава 8. Космический эксперимент «Космокард». Изучение влияния факторов космического полета на электрофизиологические характеристики миокарда и их связь с процессами вегетативной регуляции кровообращения при длительном воздействии невесомости	
<i>Р. М. Баевский, В. Б. Русанов, А. Г. Черникова, Е. Ю. Берсенева, Г. Г. Иванов, Д. А. Прилуцкий.....</i>	303
Введение.....	303
8.1. Научная аппаратура. Методика исследований.....	306
8.2. Результаты исследований.....	314
8.2.1. Суточная динамика показателей variability сердечного ритма.....	314
8.2.2. Функциональное состояние организма в дневные и ночные часы на разных этапах космического полета.....	316
8.2.3. Результаты дисперсионного картирования ЭКГ.....	322
Заключение.....	329
Заключение.....	331
Литература.....	337

От редакторов

Космическая медицина и один из ее ведущих разделов — космическая кардиология на протяжении полувека являлись источником новых идей, методик и технических разработок, которые оказали большое влияние на развитие многих областей медицины и физиологии. Особенно плодотворным оказалось это влияние для авиационной медицины, медицины экстремальных состояний и профилактической медицины, а также для тех научно-практических направлений, где разрабатывались вопросы сохранения здоровья и работоспособности людей, работающих в условиях стрессорных воздействий.

Предлагаемая читателям коллективная монография представляет собой своеобразный отчет о деятельности лаборатории изучения вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы в условиях космического полета, которая была организована в Институте медико-биологических проблем РАН более 50 лет назад — в 1964 г. Вначале это была лаборатория медицинской кибернетики, затем она стала лабораторией прогнозирования функционального состояния в космических полетах, затем лабораторией автоматизации физиологических измерений в космосе. Но основным направлением научно-практической деятельности лаборатории всегда оставалась космическая кардиология. Лаборатория была создана по инициативе выдающихся советских ученых: академиков Василия Васильевича Парина и Андрея Владимировича Лебединского. Их влияние на деятельность лаборатории прослеживается на протяжении всей ее 50-летней истории.

Академик Парин В. В. был одним из ведущих мировых ученых в области физиологии кровообращения. Одним из главных направлений научной деятельности Василия Васильевича была космическая кардиология. Этот новый раздел космической медицины сформировался в 60-е годы прошлого столетия под его непосредственным руководством. В те годы активно шел анализ получаемой из космоса новой научной информации о влиянии на организм человека факторов космического полета и прежде всего о влиянии невесомости



Рис. 1. Академик Парин В. В.

космической кардиологии», где рассматривалась роль реакций системы кровообращения в приспособлении организма к условиям невесомости. Показано, что ведущее значение при этом принадлежит вегетативной нервной системе и что основным методом изучения вегетативной регуляции кровообращения является анализ variability сердечного ритма (ВСР). Этот метод, который получил затем широкое применение в различных областях медицины, фактически «родился» в космической кардиологии. В 1967 г. вышла монография Парина В. В., Баевского Р. М., Волкова Ю. Н. и Газенко О. Г. «Космическая кардиология». В этой книге обобщен широкий круг проблем, связанных с влиянием факторов космического полета на систему кровообращения. При этом сердечно-сосудистая система рассматривается как индикатор адаптационных реакций целостного организма. На основе обобщения результатов первых космических полетов был сформулирован ряд важных научно-теоретических положений, имеющих концептуальный характер и во многом определивших дальнейшее развитие космической кардиологии.

Академик Лебединский А. В. известен как один из ведущих мировых специалистов в области физиологии вегетативной нервной системы. Будучи первым директором Института медико-биологических проблем, он направил деятельность новой лаборатории на изучение

на сердечно-сосудистую систему. Первые обобщения этой новой информации представлены в статье Парина В. В., Баевского Р. М. и Газенко О. Г. «Сердце и кровообращение в условиях космоса», которая в 1965 г. на английском языке была опубликована в журнале *Cog et Vasa*, а также в опубликованной в том же 1965 г. в журнале «Кардиология» статье «Достижения и успехи

вегетативной регуляции функций в космическом полете. Под его руководством сотрудниками лаборатории были выполнены первые экспериментальные исследования на собаках, в ходе которых была научно обоснована возможность использования методов анализа variability сердечного ритма для оценки активности разных уровней вегетативной регуляции системы кровообращения.

Большое влияние на деятельность лаборатории в последние 25 лет оказал академик Анатолий Иванович Григорьев. Он был последним аспирантом Василия Васильевича Парина и перенял его лучшие черты: широкий научный кругозор, активную поддержку творческих начинаний, дружелюбие и интеллигентность. Став директором института в 1988 г., он открыл лаборатории широкую дорогу к международному сотрудничеству и активно содействовал включению ее научных разработок в программы исследований на Международной космической станции. При непосредственном участии Анатолия Ивановича в космической медицине сформировалось новое научное направление — донологический подход к оценке состояния здоровья членов

космических экипажей. В книге Григорьева А. И. и Баевского Р. М. «Концепция здоровья и космическая медицина» (2007) рассмотрены перспективы дальнейшего развития донологического подхода в практике здравоохранения и в прикладной физиологии.

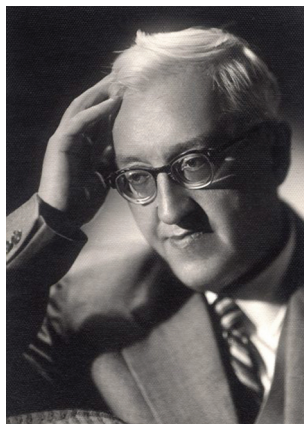


Рис. 2. Академик Лебединский А. В.



Рис. 3. Академик Григорьев А. И.

Разработка новых методов, приборов и технологий в области космической медицины всегда имела первостепенное значение в связи с тем, что, во-первых, объект наблюдения — космонавт находится на значительном расстоянии от исследователя, во-вторых, организм человека находится в необычных условиях среды и его реакции до сих пор в достаточной степени не изучены, в-третьих, большинство современных высокотехнологичных клинических методов технически невозможно использовать на борту космического корабля. Кроме того, современная медицина серьезно вооружена лишь для борьбы с заболеваниями, особенно с наиболее тяжелыми и опасными. Но когда речь идет о практически здоровых людях, какими являются космонавты, набор методов исследования и контроля крайне ограничен.

Поэтому космическая медицина должна заново разрабатывать новые подходы к оценке здоровья здорового человека. В некоторых случаях эти новые подходы оказываются новыми и для медицины в целом, и для физиологии в частности. Примером этому является возникновение и развитие методов анализа вариабельности сердечного ритма, которые впервые были использованы в космосе в начале 60-х годов, а сейчас являются одними из наиболее популярных в мире методов исследования. Аналогичная картина наблюдается и в отношении донозологической диагностики, которая начала развиваться в космической медицине с конца 70-х годов. Сейчас это новое научно-практическое направление еще только начало активно использоваться в практической медицине, но следует ожидать, что в самые ближайшие годы мы станем свидетелями его бурного внедрения в различные сферы профилактической медицины и прикладной физиологии.

Именно эти два взаимосвязанных и взаимодополняющих друг друга направления (анализ вариабельности сердечного ритма и донозологическая диагностика) в течение более 50 лет были основными объектами научной деятельности лаборатории. Оба эти направления практически реализованы в виде конкретных аппаратно-программных комплексов, как используемых на борту

Международной космической станции, так и предназначенных к «земному» применению в профилактической медицине и в прикладной физиологии. Последнее особенно важно потому, что земная медицина нацелена в основном на больного человека и практически не располагает ни методами, ни средствами для реального изучения и оценки здоровья здорового человека. В настоящее время только космическая медицина реально умеет оценивать состояние здоровья здорового человека и ежедневно ведет эту работу на Международной космической станции. Именно поэтому в 2013 г. в ГНЦ РФ — ИМБП РАН был создан Инновационный центр космической медицины, задачей которого является внедрение в практику земной медицины новейших разработок, выполняемых для использования в космосе.

В монографии вначале рассматриваются те новые методические подходы, которые возникли или были серьезно модифицированы в рамках космической медицины. Это, прежде всего, анализ вариабельности сердечного ритма и донозологическая диагностика. Затем излагаются материалы, относящиеся к методам сейсмокардиографии и баллистокардиографии. Оба они сыграли важную роль в изучении сна в условиях космического полета. Кроме того, баллистокардиография в проводимом с 2014 года на МКС новом космическом эксперименте «Кардиовектор» используется в новой модификации, обеспечивая получение картины пространственного распределения энергии сердечных сокращений. Это принципиально новый шаг в познании закономерностей функционирования сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости.

Далее в монографии представлена подробная информация о приборах и методах на борту Международной космической станции. Здесь даны и технические описания приборов, и описания используемых программных средств, и методики проведения космических экспериментов. Наибольшую ценность представляет изложение результатов проведенных исследований, которое демонстрирует современное состояние космической кардиологии, ее успехи и перспективы.

Представляемая читателю коллективная монография отражает многообразные аспекты проблемы создания новых приборов

и методов для изучения здоровья здорового человека в космическом полете. Идеи и технические решения, реализованные на борту МКС в виде научных космических экспериментов, успешно применяются и в земной медицине. Мы надеемся, что публикуемые материалы вызовут интерес со стороны специалистов по функциональной диагностике, физиологов и практических врачей, а также инженеров и математиков, работающих в области создания новых медицинских приборов.

*Директор ИМБП РАН
академик РАН, доктор медицинских наук
Орлов О. И.*

*Главный научный сотрудник ИМБП РАН
доктор медицинских наук, профессор
Баевский Р. М.*

Предисловие

В данной монографии обобщаются результаты работы большого коллектива сотрудников Института медико-биологических проблем РАН и фирмы «Медицинские компьютерные системы», которые в 2002–2012 гг. подготовили и провели на борту Международной космической станции уникальные космические эксперименты «Пульс», «Пневмокард» и «Сонокард», а с 2014 года дали старт новым космическим экспериментам «Кардиовектор» и «Космокард».

Все эти эксперименты относятся к области космической кардиологии, одному из ведущих разделов космической медицины. Космическая медицина, и в том числе космическая кардиология, в течение последних 50 лет представляли собой научно-практические направления, в которых активно развивались новые методы и технологии, создавались новые приборы. Все новые разработки для космоса вначале испытывались на земле, и многие из них затем использовались в практике здравоохранения.

Ведущими авторами монографии являются Роман Маркович Баевский, Дмитрий Анатольевич Прилуцкий, Ирина Исаевна Фунтова, Елена Сергеевна Лучицкая и Анна Григорьевна Черникова. Вот краткая информация о них:

1) Баевский Р.М. — главный научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, доктор медицинских наук, профессор, научный руководитель космических экспериментов на МКС, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Международной академии астронавтики;

2) Прилуцкий Д.А. — генеральный директор фирмы «Медицинские компьютерные системы», кандидат технических наук, технический руководитель разработки аппаратно-программных комплексов для выполнения космических экспериментов на борту МКС и ряда научных проектов по внедрению космических технологий в практику здравоохранения;

3) Фунтова И.И. — ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук, ответственный

исполнитель космических экспериментов «Пульс», «Пневмокард», «Сонокард», «Кардиовектор», действительный член Международной академии астронавтики;

4) Лучицкая Е. С. — старший научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук, ведущий исполнитель космических экспериментов «Пневмокард», «Сонокард» и «Кардиовектор», член-корреспондент Международной академии астронавтики;

5) Черникова А. Г. — старший научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук, ведущий исполнитель космических экспериментов «Пульс», «Пневмокард», «Сонокард» и «Космокард», действительный член Международной академии астронавтики.

В подготовке материалов монографии и в разработке методов и приборов принимали участие: 1) Иванов Г. Г. — ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, доктор медицинских наук, профессор, заведующий отделом кардиологии Московской медицинской академии; 2) Берсенев Е. Ю. — заведующий лабораторией ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук, генеральный директор Инновационного центра космической медицины, член-корреспондент Международной академии астронавтики; 3) Берсенева А. П. — ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, доктор биологических наук; 4) Танк Й. — ведущий научный сотрудник Высшей медицинской школы Ганновера (Германия), доктор медицинских наук, профессор; 5) Усс О. И. — научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, инженер-программист; 6) Семенов Ю. Н. — директор ООО «Институт внедрения новых медицинских технологий Рамена», кандидат биологических наук; 7) Слепченкова И. Н. — научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук; 9) Русанов В. Б. — старший научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук, ответственный исполнитель космического эксперимента «Космокард»; 10) Исаева О. Н. — научный сотрудник ГНЦ РФ — ИМБП РАН, кандидат биологических наук.



Таким образом, в написании данной монографии принимали участие как научные сотрудники — медики и физиологи, специалисты в области космической медицины и космической кардиологии, так и инженеры — разработчики приборов и программных средств. Именно совместная дружная работа специалистов различного профиля позволила получить эффективные результаты в виде уникальных экспериментов и уникальных научных приборов на борту Международной космической станции.

Целью настоящей монографии является не только обобщение опыта научно-технических разработок в области космической медицины, но и оформление отечественного приоритета в ряде важных научных направлений. Как известно, российская космическая медицина — продолжатель советских космических исследований с участием человека, начало которым было положено первым космическим полетом Юрия Гагарина. Она в течение многих лет занимала передовые позиции в изучении влияния на организм условий длительного действия невесомости. С появлением Международной космической станции такие исследования существенно расширились. Однако в силу ряда причин результаты российских исследований крайне мало публикуются в международных изданиях и информация о многих важных достижениях российской науки остается неизвестной мировому научному сообществу.

Данная монография призвана обобщить достижения российской космической медицины в одном из ее ведущих разделов — космической кардиологии, в частности в разработке методов и приборов, используемых для проведения космических экспериментов в условиях длительного космического полета. Описываются установленные на борту Международной космической станции уникальные аппаратно-программные комплексы «Пuls», «Пневмокард», «Сонокард», «Кардиовектор» и «Космокард», обеспечившие получение новых уникальных научных результатов о влиянии длительной невесомости на сердечно-сосудистую систему человека.

В первой главе монографии «Исторический обзор» освещается полувековой путь от созданной в 1964 г. в ИМБП лаборатории

медицинской кибернетики до лаборатории изучения вегетативной регуляции кровообращения, которая провела ряд уникальных научных экспериментов на борту МКС. Во второй главе космическая кардиология рассматривается как один из ведущих разделов космической медицины. Третья глава посвящена изложению некоторых новых методических подходов, разработанных в космической кардиологии. Этот раздел монографии открывается изложением методологии донозологической диагностики, а затем следует описание методов анализа variability сердечного ритма (ВСР), которые получили свое развитие именно в рамках космической медицины (раздел 3.2). Анализ ВСР занимает в космической кардиологии ведущее место, поскольку позволяет выявлять изменения регуляции, предшествующие энерго-метаболическим и гемодинамическим сдвигам. Этот метод явился базой для развития донозологической диагностики (раздел 3.1), направленной на изучение состояний организма, пограничных между нормой и патологией. В свою очередь, донозологический подход позволил разработать новые принципы оценки риска развития патологии, что очень важно для практики медицинского обеспечения космических полетов. Следующий раздел посвящен методам сейсмокардиографии и баллистокардиографии, которые играют важную роль в изучении сократительной функции сердца и его энергетических возможностей.

Последующие главы посвящены описанию используемых для выполнения космических экспериментов уникальных аппаратно-программных комплексов, разработанных в ООО «Медицинские компьютерные системы», и результатам проведенных с их помощью космических экспериментов. Здесь, наряду с доступным изложением общих принципов получения информации о различных аспектах работы сердечно-сосудистой системы, рассматриваются специфические для условий космического полета особенности сбора и анализа данных. Описываются конкретные аппаратно-программные комплексы, обеспечившие проведение космических экспериментов на Международной космической станции (МКС) в течение последних 15 лет (с 2002 г. по 2016 г.). Это «Пulsь», «Пневмокард» и «Сонокард»,

каждому из которых посвящена отдельная глава. В последних двух главах представлены материалы о новых комплексах «Кардиовектор» и «Космокард». Космические эксперименты с использованием этих комплексов начали проводиться на борту МКС с 2014 года.

Настоящая монография содержит описания не только методов и приборов космической кардиологии, но и результатов их использования в космических исследованиях и на Земле. Очень важно, что эти результаты иллюстрируют эффективность использования космических технологий. Авторы надеются, что представленные материалы послужат стимулом к дальнейшему развитию новых методов и приборов для научных исследований в космосе и решения практических задач в земной медицине.

ГЛАВА I

Исторический обзор

Р. М. Баевский, И. И. Фунтова

История этой книги начинается в мае 1964 года, когда во вновь созданную лабораторию медицинской кибернетики Института медико-биологических проблем пришла на преддипломную практику выпускница Московского авиационного института Ирина Исаевна Фунтова. Выбор темы диплома был непростым, поскольку мы должны были, с одной стороны, учесть характер специальности дипломника — «Радиоуправление летательными аппаратами», а с другой стороны, иметь в виду, что работа выполняется в учреждении, которое работает в области космической медицины. У меня, руководителя лаборатории Романа Марковича Баевского, к тому времени уже был солидный опыт разработки приборов для исследования космонавтов на кораблях «Восток» и «Восход». Я участвовал также в создании первых телемедицинских систем для передачи и анализа медицинской информации с борта космических объектов на Землю. Это в определенной степени определило выбор темы дипломного проекта. Мы решили разработать биокибернетическое устройство для дистанционного управления транспортным средством. Не последнюю роль в выборе темы сыграло и то, что в те годы началось обсуждение возможности первых полетов человека на Луну и на первом этапе — создание управляемого с Земли лунохода. (Это, кстати, и свершилось в середине 60-х годов, когда на Луне появился первый советский луноход.)

В результате мы с Ириной Исаевной, предвосхищая задачи будущей лунной космической программы, решили сконструировать дистанционно биоуправляемый автомобиль, в котором

сигналы управления формировались бы биопотенциалами мышц руки человека-оператора. Мы тогда были еще очень молоды и не представляли себе до конца ни сложности поставленной задачи, ни ее перспективного значения. Но выбор был сделан, и для начала в магазине «Детский мир» был куплен радиоуправляемый детский автомобиль — одна из последних технических новинок того времени. Главным предметом нашего творческого поиска стало создание системы преобразования мышечных биопотенциалов (электромиограммы) в сигналы управления.

В итоге дипломный проект был защищен на «отлично» и детский «автомобиль» под аплодисменты аттестационной комиссии уверенно перемещался по залу авиационного института, подчиняясь незримым командам, передаваемым по радиоканалу от электродов на руке дипломницы. Достаточным было только легкое напряжение определенных групп мышц руки, почти «мысленная команда», и автомобиль послушно поворачивал налево или направо, разворачивался или давал задний ход. Такой вид биоуправления был бы незаменим в случае высадки космонавта на поверхность планеты с силой тяжести, превышающей земную, когда движение рук вызывает большие трудности. Следует отметить, что только через 16 лет в ноябре 1970 года первый советский луноход, доставленный станцией «Луна-17», съехал на поверхность Луны, подчиняясь аналогичным командам оператора с Земли. Так мы с Ириной, сами того не ведая, оказались «впереди планеты всей»!

Но я и мои коллеги действительно оказались первыми в разработке нового метода оценки процессов управления в живом организме, который теперь известен во всем мире как анализ вариабельности сердечного ритма (ВСР). Историю этого метода можно начать с космических путешественниц — собак Белки и Стрелки, которые были первыми живыми существами, вернувшимися на Землю после суточного пребывания в условиях невесомости. Мне посчастливилось участвовать в подготовке этого полета, и тогда совершенно отчетливо у собак в полете было обнаружено урежение сердечного ритма и резкое повышение колебаний (вариабельность) частоты пульса.

Это явление было затем подтверждено при первых пилотируемых полетах человека, и вполне обоснованным было признание вариабельности сердечного ритма в качестве одного из показателей работы системы вегетативной регуляции. Собственно говоря, и лаборатория медицинской кибернетики во вновь организованном Институте медико-биологических проблем была создана по предложению академика Парина В. В. в интересах изучения и развития этого нового метода.

Первый директор Института медико-биологических проблем академик Лебединский А. В., как известно, был одним из ведущих мировых физиологов — специалистом в области исследований вегетативной нервной системы. Поэтому неслучайным было его первое поручение сотрудникам лаборатории медицинской кибернетики активно включиться в изучение проблем вегетативной регуляции сердечного ритма. Он познакомил нас с выдающимся в то время хирургом Демиховым В. П., который первым в мире произвел пересадку сердца у собак. Идея эксперимента была простой и изящной: записать электрокардиограмму у собаки с пересаженным (вторым) сердцем и исследовать изменения сердечного ритма при физической нагрузке. Именно в этом эксперименте был получен результат, который сегодня хорошо известен из всех учебников как двухуровневая регуляция сердечной деятельности: быстродействующая нервная регуляция за счет вегетативной нервной системы и медленная гуморальная за счет гормонов и электролитов. Оказалось, что при физической нагрузке пульс собственного сердца собаки быстро учащался, а ритм пересаженного сердца, лишенного нервных связей с организмом, изменялся с большим запаздыванием.

Дальнейшее изучение регуляции сердечного ритма в экспериментах с гипокинезией и изоляцией и в реальных космических полетах показало, что этот метод позволяет получать много новой информации об изменениях в различных звеньях регуляторного механизма. Активно включилась в исследования по анализу регуляции сердечного ритма новый сотрудник лаборатории Галина Андреевна Никулина — молодой врач, эндокринолог с опытом практической



работы в медсанчасти. Изучались реакции организма при физических нагрузках и в гиподинамии, при перестройке режима труда и отдыха, при психоэмоциональных воздействиях. Были проведены исследования при перелетах спортсменов по маршруту Москва — Хабаровск — Сахалин. В 1966 г. в Москве состоялся 1-й симпозиум по математическому анализу сердечного ритма, на котором было представлено около 50 докладов. Новый метод стали применять в клинике, в спорте, в физиологии труда. В 1967 г. на 18-м Конгрессе Международной астронавтической федерации в Белграде был представлен доклад академика Парина В. В. в соавторстве с Баевским Р. М. и Никулиной Г. А. «Ритм сердечных сокращений как индикатор нейроэндокринной регуляции». Но наиболее полный обзор результатов первых исследований по математическому анализу сердечного ритма в космических полетах был опубликован в монографии «Космическая кардиология» (Парин В. В., Баевский Р. М., Волков Ю. Н., Газенко О. Г.), которая была опубликована в 1967 году.

Лаборатория медицинской кибернетики активно занималась и многими другими методиками физиологических исследований в космосе. В то время все делалось впервые. Мы тогда разработали методику регистрации письменной речи с помощью электронного устройства (1965), впервые начали заниматься вводом физиологических сигналов в вычислительную машину (1966), проводили первые телемедицинские записи электрокардиограммы (1967), впервые провели автоматический анализ сердечного ритма при физической нагрузке (1968). В 1969 г. была опубликована статья Баевского Р. М. и Фунтовой И. И. «Методика бесконтактной регистрации деятельности сердечно-сосудистой и дыхательной системы», положившая начало нашим дальнейшим работам по созданию системы бесконтактной регистрации физиологических функций в длительных космических полетах. Но, несмотря на то что Ириной Исаевной был запатентован принципиально новый для кардиологии прибор — диэлектрограф, в последующем мы использовали для бесконтактных систем методы баллисто- и сейсмокардиографии. Первые баллистокардиографические исследования в космосе нами были проведены лишь в конце

70-х годов, но сейсмокардиография была использована в системе медицинского контроля уже в 60-е годы, когда начались первые полеты транспортных кораблей «Союз». В дополнение к традиционным для медицинского контроля записям ЭКГ и дыхания мы предложили использовать сейсмокардиографию как метод, позволяющий немедленно обнаружить внезапную остановку сердца, в то время как сигналы ЭКГ все еще продолжают регистрироваться. СКГ-датчик использовался в нагрудных поясах космонавтов вплоть до конца 80-х годов.

Другим важным для медицинского контроля предложением лаборатории был метод контроля за эффективностью физических тренировок космонавтов на борту орбитальной станции. В начале 70-х годов еще не было технических средств для регистрации ЭКГ во время выполнения нагрузок и последующей передачи данных на Землю. Ириной Исаевной Фунтовой был предложен оригинальный выход из этого положения: записывать ЭКГ в виде звуковых сигналов на миниатюрный магнитофон и затем передавать эти сигналы по радиопереговорному каналу с последующей демодуляцией их на Земле и получением исходной электрокардиограммы. Реализация этого метода позволила наладить надежный контроль за физическими тренировками космонавтов и обеспечить их высокую готовность к перегрузкам на спуске и к возвращению на Землю. Предложенный принцип контроля физических тренировок продолжает использоваться в космосе до настоящего времени, но, конечно, на современной технической базе с применением цифровой регистрации сигналов и Интернета.

В 80-е годы нами был сделан важный шаг из космоса в земную медицину. Этот шаг тесно связан с развитием методов анализа вариабельности сердечного ритма и с созданием на его базе нового научного направления — донозологической диагностики. При оценке состояния здоровья космонавтов трудно было найти в клинической медицине адекватные термины для обозначения различных оттенков и вариантов нормы. Традиционный термин «предболезнь» оказался непригодным, поскольку в клинической практике под ним понимали признаки конкретной патологии, например предынфарктное



состояние или предъявленные симптомы. У космонавтов практически всегда состояние оценивалось как «норма», хотя и имелись особенности в психологическом статусе, физической подготовленности или в эмоциональном настрое. Все это влияло на их готовность к полетным нагрузкам и нагрузкам на спуске при возвращении на Землю.

Отсутствие адекватного подхода к оценке различных вариантов нормы во время космического полета особенно четко выявилось, когда потребовалось разработать систему прогнозирования состояния здоровья применительно к первым длительным экспедициям на орбитальной станции «Салют-4». В 1974–1976 гг. наша лаборатория предложила использовать метод экспертного прогнозирования, который в то время был единственно приемлемым при отсутствии достаточных знаний о реакциях организма человека на длительное действие невесомости (Баевский Р. М. и др., 1978). Альтернативой этому подходу было применение методов анализа variability сердечного ритма, характеризующих вегетативный баланс, которые хорошо отражали особенности реакции организма на стрессорные воздействия. Требовалась разработка нового подхода к оценке состояния здоровья космонавтов. Такой подход, основанный на использовании математического анализа сердечного ритма, был представлен в статье Баевского Р. М. «К проблеме прогнозирования состояния человека в условиях космического полета» (1972). Но для получения более надежных маркеров мы начали работать с данными о состоянии практически здоровых людей. В 1975–1978 гг. были организованы обширные массовые профилактические осмотры населения совместно с Институтом физиологии Сибирского отделения АМН СССР. Большую поддержку этому направлению оказал директор института академик Влаиль Петрович Казначеев. В этих исследованиях активное участие принимала Азалия Павловна Берсенева — в то время доцент кафедры физического воспитания Уральского политехнического института. Было обследовано несколько тысяч работников промышленных предприятий в Новосибирске. При этом использовалась достаточно простая методика: антропометрические измерения,

определение артериального давления и регистрация электрокардиограммы, баллистокардиограммы и сейсмокардиограммы. Математический анализ сердечного ритма проводился вручную (в основном строились гистограммы с вычислением статистических показателей и индексов напряжения). Результатом этой работы было выделение репрезентативных групп здоровых людей, находящихся в состояниях, пограничных между нормой и патологией. Эти состояния были названы донозологическими (1978). В 1981 г. была издана монография Казначеева В. П., Баевского Р. М. и Берсеновой А. П. «Донозологическая диагностика в практике массовых обследований населения». Таким образом, возникшая в космической медицине потребность в более детальной оценке уровня здоровья и его изменений в условиях космического полета явилась стимулом к появлению нового научного направления — донозологической диагностики. В конце 70-х годов о донозологических состояниях уже было сделано множество докладов на различных научных конференциях и симпозиумах, в том числе о донозологических исследованиях в космических полетах. В 1983 г. в книге «Физиологические исследования в невесомости» был подробно изложен новый донозологический подход к прогнозированию состояния здоровья космонавтов в длительных полетах.

Дальнейшее развитие донозологического подхода связано с первыми шагами по внедрению достижений космической медицины в практику здравоохранения. В конце 70-х — начале 80-х годов советским правительством было принято решение о всеобщей диспансеризации населения и стали появляться разнообразные системы для автоматической обработки медицинских данных, позволяющие разделять потоки пациентов на группы по нуждаемости в углубленном обследовании. Донозологическая диагностика была в данном случае крайне востребованным подходом к решению этой проблемы. На фоне благоприятной «политической» ситуации и благодаря личным связям в 1981 г. удалось создать специальную лабораторию массовых прогностических обследований населения при Московском областном научно-исследовательском клиническом институте (МОНИКИ). Руководить лабораторией была приглашена

из Свердловска Азалия Павловна Берсенева — наш соавтор по массовым донозологическим исследованиям в Сибири.

Одной из первых совместных разработок Института медико-биологических проблем и новой лаборатории МОНИКИ была передвижная автоматизированная лаборатория «Автосан-82» (рис. 1.1). Это был первый шаг на пути внедрения достижений космической медицины в практику здравоохранения. «Автосан-82» был оснащен такой же медицинской аппаратурой, как и орбитальная станция «Салют-6», находившаяся в то время на орбите. Кроме того, в автоматизированной лаборатории имелся медицинский компьютер, который появился на орбитальных станциях только спустя 20 лет.

Передвижная лаборатория «Автосан-82» ознаменовала собой начало не только использования в «земной» медицине космических приборов и методик, но, главное, новой методологии оценки здоровья — донозологической диагностики. Это новое научно-практическое направление было создано в нашей лаборатории применительно



Рис. 1.1. Передвижная автоматизированная лаборатория «Автосан-82». Слева направо авторы разработки: Азалия Павловна Берсенева, Роман Маркович Баевский, Ирина Исаевна Фунтова, Вадим Алексеевич Степанов

к оценке функционального состояния космонавтов, и «Автосан-82» был реальной демонстрацией возможностей применения донозологической диагностики в практике здравоохранения. В последующем в лаборатории массовых прогностических обследований населения МОНИКИ совместно с ИМБП была создана автоматизированная система «Вита-87», которая использовалась при массовой диспансеризации населения и была рекомендована Минздравом СССР к широкому внедрению в практику.

В 80-е годы лаборатория активно работала над развитием новых методов исследования в космосе. На борту орбитальной станции «Мир» была впервые проведена непрерывная регистрация электрокардиограммы в течение 24 часов (метод холтеровского мониторирования). Этот метод, до того используемый лишь в клинике, благодаря дополнительному математическому анализу сердечного ритма дал много важной научной информации о функциональном состоянии космонавтов и о вегетативной регуляции системы кровообращения на разных этапах полета и, главное, в послеполетном периоде. Холтеровское мониторирование стали проводить в каждом длительном полете. Это стало возможным благодаря инициативе и энтузиазму Галины Андреевны Никулиной.

Вегетативная регуляция функций изучалась нами не только с помощью математического анализа сердечного ритма. По предложению научного сотрудника лаборатории Татьяны Дмитриевны Семенович был поставлен бортовой эксперимент с изучением минералосекреторной функции слюнных желез. Для этого до, во время и после полета космонавты собирали в пробирки по 5–10 мл слюны. Шутили, что провести такой эксперимент — это раз плюнуть! В доставленных на Землю пробах слюны определялось содержание калия и натрия. По их соотношению делалось заключение о состоянии системы, продуцирующей в организме кортикостероидные гормоны, — одного из ведущих регуляторов вегетативного баланса.

Все проводимые нами бортовые исследования были направлены на то, чтобы получить дополнительную информацию для прогнозирования функционального состояния космонавтов, поскольку всем



была понятна недостаточность стандартных заключений о том, что отклонений в состоянии здоровья не обнаружено и что полет может продолжаться по утвержденной программе. Важным был бы прогноз функционального состояния или хотя бы его адекватная оценка. Прогнозировать вероятные изменения функционального состояния космонавтов в полете на основе имевшихся в то время знаний было нереально. Поэтому для решения задачи прогнозирования мы применили метод экспертных оценок. Этот метод весьма популярен в различных областях знания и основывается на использовании опыта и интуиции специально отобранных экспертов. Большая заслуга в развитии этого метода применительно к нашим задачам и во внедрении его в практику космической медицины принадлежит Елене Владимировне Хозяиновой. Она много лет работала в нашем Центре управления медицинским обеспечением полетов, прекрасно знала и наших ведущих специалистов — экспертов, и ситуацию на борту орбитальной станции «Мир».

Одним из важнейших направлений научной деятельности лаборатории в 80-е годы было развитие баллистокardiографических исследований в космосе. Первая баллистокardiограмма была записана в декабре 1977 г. у командира экипажа орбитальной станции «Салют-6» Юрия Романенко. На борту орбитальных станций «Салют-6» и «Салют-7» записи продольных БКГ были проведены в начальном периоде невесомости (совместный советско-румынский полет, 1981 г.) и в длительном полете (4-я экспедиция, 183 дня), а первая пространственная БКГ (с последовательной регистрацией по трем осям) была получена в 1984 г. в совместном советско-индийском полете. Бортовой эксперимент «Вектор» с применением СКГ и 3-мерной пространственной БКГ был проведен на борту орбитальной станции «Мир» (6-я экспедиция, 1990 г.).

В конце 80-х годов лаборатория выполнила важнейший и интереснейший проект по созданию автоматизированной системы медицинского контроля за экипажем многоцветного космического корабля «Буран». Это была закрытая тема, так как «Буран» успел совершить только один беспилотный полет, хотя был, бесспорно, достойным

соперником американских «Шаттлов», которые появились в космосе почти на 10 лет позже. Наша система автоматического медицинского контроля разрабатывалась при участии Тольяттинского ОКБ «Парсек» на базе первого советского персонального компьютера. Ирина Исаевна Фунтова в сотрудничестве с Анатолием Павловичем Шулеениным практически сутками занимались отладкой компьютерных программ, не выходя из ЦУМОКО, где монтировался наземный комплекс системы. Регистрировались электрокардиограмма, дыхание, сейсмокардиограмма и артериальное давление. Эти параметры вводились в ЭВМ, автоматически анализировались, представлялись на дисплей экипажу и передавались по телеметрии на Землю. Это была первая в мире реально действующая автоматизированная система дистанционного медицинского контроля. До сих пор еще не создано аналогичных систем. И, к сожалению, мы были лишены возможности широко продемонстрировать работу этой системы или опубликовать научные материалы о ее разработке.

В 1989 г., когда директором института стал Анатолий Иванович Григорьев, в жизни лаборатории начался новый этап. Наши исследования приобрели международный характер, началось сотрудничество с учеными Австрии, Франции и США. Сотрудники лаборатории стали регулярно выезжать за рубеж для участия в научных конференциях и проведения совместных исследований. Ответственным за кардиологический раздел российско-австрийской научной программы был назначен Баевский Р. М. В 1992–1995 гг. мы с Ириной Исаевной Фунтовой организовали и провели совместно с австрийцами на борту ОС «Мир» три научных эксперимента «Пульстранс», «Сон» и «Ночь». Эксперимент «Пульстранс» родился в результате детального обсуждения проблем регуляции сосудов со всемирно известным специалистом по сосудистой физиологии директором Института физиологии в городе Граце (Австрия) профессором Кеннером В. Предложенные им методы были дополнены нашими идеями, и в итоге были получены новые уникальные данные о влиянии невесомости на сосудистый тонус.

Что касается эксперимента «Ночь», то это было воплощением нашей давнишней мечты обесконтактной регистрации физиологических



функций в космическом полете. Еще в 1990 г. на станции «Мир» мы провели длительную запись баллистокардиограммы в течение суток, используя для этого один из каналов прибора для холтеровского мониторинга. Это было как раз в начале обсуждения с австрийцами программы совместных исследований с использованием бортового компьютера «Кюмо». И тогда родился план использования бортового компьютера для записи баллистокардиограммы в течение ночи. Чувствительный акселерометрический датчик было решено установить на спальном мешке космонавта. В невесомости колебания спального мешка хорошо воспроизводили ритм сердечных сокращений и дыхание. Эксперимент «Ночь» был проведен у четырех космонавтов в ходе длительных полугодовых полетов. А врач-космонавт Валерий Поляков проводил эти уникальные исследования в течение всего своего рекордного 14-месячного полета.

В начале 90-х годов началось активное сотрудничество с НАСА. Американцы проявили большой интерес к нашим исследованиям по холтеровскому мониторингу. В 1991–1992 гг. мы дважды с Галиной Андреевной Никулиной ездили в США, в г. Хьюстон. В результате была подготовлена российско-американская программа совместных исследований по холтеровскому мониторингу. На ОС «Мир» были проведены эксперименты в 10 длительных экспедициях, было опубликовано несколько совместных работ (Баевский Р. М., Никулина Г. А., 2000, Баевский Р. М., Богомолов В. В. и др., 2000).

В развернувшемся с середины 90-х годов российско-французском сотрудничестве в области космической медицины активное участие приняла Ирина Исаевна Фунтова. Совместный научный эксперимент «Портопресс», в котором впервые исследовались изменения барорефлекторной регуляции в условиях невесомости, был проведен на ОС «Мир», а затем продолжен на Международной космической станции.

Начиная с 90-х годов ведущее место в международных связях лаборатории занимает Германия. В годы перестройки, в период становления нового российского государства, когда наш институт

испытывал громадные финансовые трудности и многие научные лаборатории были на грани закрытия, мы получили приглашение поработать в одной из немецких клиник и внедрить в практику методы донозологической диагностики. Основную роль в этом сыграл наш немецкий коллега — молодой доктор Йенс Танк. Он был иностранным студентом факультета медицинской кибернетики 2-го Московского медицинского института и в 1984 г. для выполнения дипломного проекта был направлен в нашу лабораторию. Йенс Танк хорошо освоил наши исследовательские подходы и особенно анализ ВСР. После окончания института он работал в ряде немецких университетов, затем проходил специализацию в США, а в начале 90-х годов вернулся в Германию в г. Дрезден. Он стал работать во вновь созданной клинике «Бавария Крейша», где активно внедрялись новые методики. По его совету сотрудники лаборатории были приглашены поработать в этой клинике. Благодаря этому наша лаборатория смогла успешно преодолеть кризисные процессы конца 90-х годов.

Наше научное сотрудничество с Йенсом Танком (теперь он профессор Высшей медицинской школы в г. Ганновере) длится уже более 30 лет. При его участии был организован и проведен на МКС космический эксперимент «Пневмокард». В 2014 г. при участии Немецкого космического агентства был подготовлен новый космический эксперимент «Кардиовектор».

В 90-е годы лаборатория активно занималась развитием методов анализа ВСР. Появление персональных компьютеров и прогресс микроэлектроники сделали возможным создание компактных и мобильных аппаратно-программных комплексов для анализа ВСР. В 1995 г. при содействии ИМБП в Рязани была создана фирма «Рамена», которая при нашем активном участии разработала комплекс «Варикард». Этот прибор в 1998 г. был рекомендован Минздравом РФ к применению в широкой медицинской практике. С помощью комплекса «Варикард» было выполнено большое число массовых и специализированных донозологических исследований. Появились и другие аналогичные комплексы. Анализ ВСР стал в России снова одним из самых популярных и распространенных методов. В 2001 г.



Рис. 1.2. Рабочая встреча с иностранными специалистами в ИМБП. Слева направо: Пьер Межотте (Бельгия), Ксавьер Нейт (Бельгия), Ирина Исаевна Фунтова, Роман Маркович Баевский, Йенс Танк (Германия)

по решению Комитета по новой медицинской технике Минздрава РФ группой из 14 российских экспертов (руководителем этой группы был Баевский Р. М.) были разработаны и опубликованы методические рекомендации по анализу ВСП. В них был систематизирован опыт многолетних отечественных исследований и был учтен зарубежный опыт. В раздел, посвященный комплексной оценке результатов анализа ВСП, была включена созданная в нашей лаборатории шкала оценок функционального состояния организма по степени напряжения регуляторных систем. Эта шкала получила популярность как система «Светофор».

Разработка новой теоретической концепции и новой методологии анализа ВСП связана с приходом в 1992 г. в наш коллектив Анны Григорьевны Черниковой. Она, психолог по образованию, хорошо владела методами математической статистики и имела опыт анализа ВСП. Включившись в работу по обобщению собранных к тому времени

данных и активно участвуя в наземных и полетных экспериментах, Анна Григорьевна разработала ряд математических моделей регуляции сердечного ритма. Нам удалось затем на основе этих моделей создать концепцию вегетативной регуляции физиологических функций в длительном космическом полете и разработать вероятностный подход к оценке риска развития патологии.

Первым нашим космическим экспериментом на МКС был «Пульс», аппаратура для которого была разработана и изготовлена фирмой «Медицинские компьютерные системы». Эта фирма стала в последующем нашим основным партнером в создании новых приборов для МКС. Эксперимент «Пульс» был предназначен главным образом для изучения регуляции сердечного ритма в длительных космических полетах и позволял регистрировать ЭКГ, дыхание и пульсовую волну с помощью фотоплетизмографического пальцевого датчика. С этой аппаратурой были проведены ежемесячные исследования в восьми длительных экспедициях, а затем в 2007 г. она была заменена комплексом «Пневмокард», который явился плодом научно-технического сотрудничества с Немецким космическим агентством.

В 2007 г. на МКС был установлен еще один наш прибор «Сонокард». Это был итог наших многолетних усилий по созданию системы бесконтактной регистрации физиологических функций во время сна. Как описано выше, еще в начале 90-х годов на ОС Мир» был проведен эксперимент «Ночь» с установкой на спальном мешке специальных датчиков для регистрации пульсовых и дыхательных движений тела. На МКС была использована иная технология. Был создан миниатюрный прибор размером с пачку сигарет, который размещался в нагрудном кармане футболки космонавта. В этом приборе имелись чувствительный акселерометрический датчик, усилитель сигналов, блок памяти и источник питания. Записанная в течение ночи в память прибора сейсмокардиограмма утром копировалась в бортовой компьютер и затем передавалась на Землю по Интернету.

Пятилетний период с 2007 по 2012 гг. был крайне важным в развитии приборов и методов космической кардиологии. Во-первых,



в эти годы на МКС успешно прошли два космических эксперимента «Пневмокард» и «Сонокард». Было проведено более 500 ежемесячных исследований с российскими членами экипажей в период с 14-й по 32-ю экспедиции. Получен уникальный научный материал. Прошли апробацию и практическое подтверждение разработанные в лаборатории новые методы исследований. Во-вторых, в 2007–2012 гг. лаборатория активно участвовала в наземном эксперименте «Марс-500», в котором имитировалась работа межпланетного экипажа при полете к Марсу. Следует специально отметить, что эксперимент «Марс-500» явился для лаборатории важным этапом работы, который можно назвать мостом между прошлым и будущим. В этом эксперименте использовались, с одной стороны, все созданные нами к началу 2007 года «космические» приборы, с другой стороны, — многие новые методические подходы и технологические решения, перспективные для использования как на МКС, так и в будущих межпланетных полетах. Кроме того, в научную программу эксперимента «Марс-500» включен предложенный нами так называемый спутниковый эксперимент по долговременному медико-экологическому мониторингованию функционального состояния практически здоровых людей.

Об этих долговременных медико-экологических исследованиях следует сказать немного подробнее. Эти исследования явились как бы продолжением начатых еще в 80-е годы работ по внедрению космических методов в практику здравоохранения. Здесь получила дальнейшее развитие методология донологической диагностики. Основная научная задача долговременных медико-экологических исследований в связи с подготовкой к межпланетным полетам состоит в оценке риска развития патологических отклонений при длительном (до 1,5–2 лет) наблюдении за состоянием здоровья практически здоровых людей. Для решения этой задачи недостаточным является наблюдение за шестью специально отобранными испытуемыми — членами «марсианского экипажа», которые находятся в контролируемых условиях изоляции и гермокамере — макете межпланетного корабля. В качестве «контрольных групп» мы предложили параллельно исследовать аналогичными методами контингенты практически здоровых

людей, находящихся в естественных социально-производственных условиях в различных по экологическим условиям регионах. Мы создали специальный прибор «Экосан-2007», который явился своеобразным аналогом передвижной автоматизированной лаборатории «Автосан-82». «Экосан-2007» вначале испытали при обследовании водителей автобусов (Баевский Р. М. и др., 2009) и летчиков гражданской авиации (Зима О. М. и др., 2009), а затем установили в гермокамере для исследования «марсианского экипажа». Этот же прибор был использован для исследования «контрольных групп» в 10 регионах мира (в России, Белоруссии, Казахстане, Чехии, Германии). Была создана телемедицинская система с использованием Интернета и специализированной базы данных, куда ежемесячно поступали результаты всех проводимых исследований.

Отдельного упоминания заслуживает развитие в рамках долговременных медико-экологических исследований так называемых приборов «домашней медицины». Исследования контрольных групп в США и Канаде проводились с использованием прибора Heart Wizard Mars-500, созданного совместно с американской компанией Biocom Technologies и канадской компанией Autosun Health Technology Inc. В этом приборе для съема информации применяется миниатюрный ушной фотоплетизмографический датчик, а преобразованные в серию кардиоинтервалов пульсовые волны используются для анализа ВСР по таким же алгоритмам, как и в комплексе «Экосан-2007». Добровольцы — участники эксперимента еженедельно проводили исследования самостоятельно в домашних условиях, и данные по Интернету поступали в базу данных. На основе опыта исследований с прибором Heart Wizard Mars-500 в настоящее время разрабатывается новый прибор «Дельта-2013», предназначенный для индивидуального донозологического контроля лиц с преморбидными и донозологическими состояниями.

Долговременные медико-экологические исследования по проекту «Марс-500» явились важным стимулом к разработке новых аппаратно-программных систем для практики здравоохранения. На базе комплекса «Экосан-2007» был создан более современный



комплекс «Экосан ТМ», который включает в себя программную систему «Риск» и прибор «Дельта-2013». Система «Риск» — это наземное воплощение апробированного в космических экспериментах метода вероятностной оценки риска развития патологии. Эта система была успешно применена при анализе результатов исследований как «марсианского экипажа», находившегося 520 дней в условиях изоляции, так и добровольцев в контрольных группах в разных регионах мира. Следует добавить также, что при обследовании «марсианского экипажа» в гермокамере был успешно использован прибор «Кардиосон-3» — аналог прибора «Сонокард», который в течение 5 лет работал на борту МКС.

История создания приборов и методов космической кардиологии — это в значительной мере история лаборатории медицинской кибернетики, организованной в 1964 г. в Институте медико-биологических проблем по предложению академика Парина В. В. — основоположника космической кардиологии. За полувековую историю существования лаборатория четырежды меняла свое название. Она была лабораторией автоматизации медицинских измерений в космосе, лабораторией прогнозирования функционального состояния космонавтов и, наконец, в последние годы — лабораторией изучения вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы. Но широкий спектр научных интересов лаборатории всегда оставался в рамках проблем космической кардиологии. Мы целеустремленно развивали одно из ведущих положений Парина В. В. о сердечно-сосудистой системе как об индикаторе адаптационных реакций всего организма. Из него возникло новое научно-практическое направление — донологическая диагностика и были разработаны принципиально новые подходы к оценке риска развития патологии в условиях длительного космического полета. Одной из центральных задач лаборатории все эти годы было развитие методов анализа variability сердечного ритма, который собственно и родился в нашей лаборатории. Важное место в научной деятельности лаборатории также занимали впервые использованные нами в космосе методы сейсмокардиографии и баллистокардиографии.