

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПИЛОТИРУЕМОЙ ЭКСПЕДИЦИИ НА МАРС*

А.И. Григорьев^{1,2}, А.Н. Потапов²

¹ МГУ имени М.В.Ломоносова, факультет фундаментальной медицины,
кафедра экологической и экстремальной медицины, Москва

² Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

История изучения космоса насчитывает несколько тысячелетий, о чем свидетельствует существование обсерваторий в древних очагах цивилизаций. И уже в далекие времена создавались мифы о полетах человека на планеты Солнечной системы. Научная астрономия возникла с использования телескопа в начале XVII века и в ходе своего развития значительно увеличила сведения о Марсе. Конец XIX и XX век стали временем рождения и становления теоретической и практической космонавтики.

Кардинальный прогресс в исследовании объектов Солнечной системы наступил с началом космической эры. При этом космонавтика стала развиваться по двум направлениям, которые включали пилотируемые околоземные полеты и межпланетные полеты автоматических аппаратов. Одновременно с этим стали разрабатываться проекты пилотируемых полетов на Луну и Марс. В настоящее время имеются весомые научно-технические предпосылки для осуществления полета человека на Марс. В России, США и Европе ведутся масштабные научные исследования и разрабатываются средства и методы для реализации будущей межпланетной экспедиции на Марс. Среди них важное место занимают вопросы медико-биологического обеспечения, которые учитывают влияние сложного комплекса факторов на состояние основных функциональных систем организма и психологический статус участников экспедиции. Большое внимание при этом уделяется вопросам совершенствования методов отбора космонавтов, профилактике гравитационных воздействий, защите от космической радиации, разработке автономных регенеративных систем жизнеобеспечения, санитарно-гигиенического обеспечению и соблюдению требований планетарного карантина.

Исследования и разработки в этом направлении в первую очередь осуществляются на Международной космической станции. При этом часть проблем решается в экспериментах на биологических спутниках и в исследованиях с моделированием факторов космического полета в лабораториях, в экстремальных природных условиях и в специальных наземных экспериментальных комплексах. Среди них важное место занимает международный проект «Марс-500» по моделированию пилотируемого полета на Марс, реализованный в 2010-2011 гг. в Институте медико-биологических проблем РАН. В результате его проведения были получены новые научные данные, сделан важный шаг, приближающий к осуществлению будущей марсианской экспедиции. Важным следствием эксперимента «Марс-500» является предложение о реализации на Международной космической станции годового эксперимента для проведения испытаний средств и методов медико-биологического обеспечения применительно к задачам пилотируемой экспедиции на Марс.

Ключевые слова: межпланетные полеты, пилотируемая экспедиция на Марс, задачи медико-биологического обеспечения экспедиции, проблемы и перспективы межпланетного пилотируемого полета

* По материалам доклада на Ученом Совете МГУ имени М.В.Ломоносова 18 июня 2012 г.

Введение

Человечество с незапамятных времен ощущало свою неразрывную связь с космосом. Несколько тысячелетий назад для наблюдений за небесными телами в Ассирии, Вавилоне, Египте, Китае, Персии, Индии, Мексике и Перу были созданы древнейшие астрономические обсерватории. Остатки удивительной астрономической обсерватории, сооруженной в каменном веке, были обнаружены в Англии (Стоунхендж). Неподалеку от Еревана найдена древнейшая обсерватория, построенная около 5 тыс. лет назад.

На протяжении веков накапливались знания о звездах, планетах Солнечной системы и Луне, которые наряду с познанием мироздания использовались в навигации и при составлении календарей, необходимых для ведения земледельческих работ.

К началу первого тысячелетия относится возникновение мифов о возможности полетов на Луну [Газенко, Шаров, 2011]. Греческий писатель Лукиан в 161 году н.э. создал произведение «Икар-омениит или заоблачный полет», в котором описал полет на Луну с помощью крыльев, а в 170 году в сочинении «Правдивая история» изобразил, что штормовой вихрь уносит моряков на Луну, где они встречают экзотичные формы жизни, активно вторгаются в местную политику и участвуют в «звездных войнах» за планету Венера. Произведения Лукиана оказали влияние на творчество Т. Мора, Ф. Рабле, И. Кеплера, Д. Свифта и других авторов фантастического жанра.

С изобретением телескопа наступило интенсивное изучение Луны и планет. Первые наблюдения Марса в телескоп были проведены Галилео Галилеем в 1610 году. Значительный вклад в изучение Марса внес итальянский астроном Джованни Кассини, который установил продолжительность марсианских суток, измерил параллакс Марса и определил расстояние Марса от Солнца и от Земли.

Голландский ученый Христиан Гюйгенс с помощью созданного им телескопа-рефрактора с 1656 г. в течение 10 лет наблюдал Марс и определил диаметр планеты. Французский астроном Никола Камилл Фламмарин в 1876 г. обнаружил сезонные изменения на Марсе и допустил возможность вегетации растений на Марсе, о чем он написал в книге «Множественность обитаемых миров». Итальянский астроном Джованни Скиапарелли создал подробную карту Марса с сетью марсианских «каналов» и допускал возможность существования на Марсе растений и разумных существ. Американский астроном Персиваль Ло-

велл с 1894 г. в течение 15 лет изучал поверхность Марса и на основании своих наблюдений создал карту и глобус планеты.

Исследования Марса увлекали астрономов, писателей и оказывали большое влияние на широкую публику. Сирано де Бержерак в книге «Космическая история государств и империй Луны» в 1656 г. описал полет к Солнцу и на Луну с помощью каравана поочередно взрывающихся ракет. В XIX и XX веках идеи будущих полетов на Луну и Марс вдохновляли Жюль Верна, Алексея Толстого, Рэя Бредбери.

Зарождение научной космонавтики и ракетных технологий

С началом XX в. связано становление теоретической и практической космонавтики. Выдающийся вклад в обоснование возможности космических полетов принадлежит нашему соотечественнику К.Э. Циолковскому, который по праву считается основоположником космонавтики. В 1883 г. в своем труде «Свободное пространство. Системное изложение научных идей» он впервые описал космический корабль с двигателем, использующим реактивный принцип. В 1895 г. было опубликовано его сочинение «Грезы о Земле и небе и эффекты всемирного тяготения», в котором обосновал идею создания искусственного спутника Земли. В 1903 г. в журнале «Научное обозрение» был напечатан классический труд Константина Эдуардовича «Исследование мировых пространств реактивными приборами», во многом опередивший свое время. Многие идеи и подходы к их воплощению, представленные в этой работе и в последующих публикациях ученого, получили развитие в современной космонавтике. Им были созданы теоретические основы ракетно-космического полета, представлены принципы устройства ракеты и ракетного двигателя на жидком топливе, рассмотрены требования к системам жизнеобеспечения для космических экспедиций. К.Э. Циолковский предложил идею электрического ракетного двигателя и отметил преимущества ракетного двигателя с использованием ядерной энергии. К.Э. Циолковский уделял большое внимание популяризации своих воззрений. Идеи о межпланетных полетах людей он описал в научно-фантастической повести «Вне Земли», изданной в 1920 г. Герои повести совершают полеты вокруг Земли, высаживаются на Луну и обследуют Солнечную систему. Автор детально рассматривает проблемы межпланетных полетов, актуальные и в наши дни (перегрузки, невесомость, жизнеобес-

печение, деятельность в корабле и вне корабля, космическая оранжерея и др.). Участниками описываемой экспедиции в 2017 году были ученые разных стран под именами Ньютон, Лаплас, Галилей, Гельмгольц, Франклин, Норденшельд и наш соотечественник Иванов, который был, вероятно, прообразом самого Циолковского с его верой в бесконечный прогресс человечества, оптимизмом и преданностью идее освоения космоса.

В США пионером ракетостроения считается Роберт Годдард (1882–1945), который в 1926 году создал и запустил ракету на жидком топливе. Ему принадлежит ряд исследований, посвященных полетам людей на Луну.

В Германии одним из пионеров космонавтики является Герман Оберт (1894–1989). В 1923 г. вышла в свет его книга «Ракета для межпланетного пространства», в которой он обосновал возможность создания ракеты на жидком топливе и определил круг вопросов, которые впоследствии пришлось решать создателям ракетной техники. В 1924 г. Оберт познакомился с трудами К.Э. Циолковского. Г. Оберт высоко оценивал исследования по космонавтике, проводившиеся в России. В 1982 г. он посетил ряд научных учреждений в Москве и Калуге и по приглашению академика О.Г. Газенко выступил с лекцией в Институте медико-биологических проблем (ИМБП).

В 30–40-е годы XX столетия в нашей стране уделялось большое внимание развитию ракетной техники. В этом направлении успешно работали талантливые ученые и инженеры Н.И. Тихомиров, Ф.А. Цандлер, Ю.В. Кондратюк, А.А. Штернфельд, Б.С. Петропавловский, С.П. Королев, М.К. Тихонравов, Г.Э. Лангемак, И.Т. Клейменов. Результаты их работ в дальнейшем послужили основой при создании космических кораблей для пилотируемых орбитальных полетов и межпланетных космических аппаратов для исследований Луны, Венеры и Марса. Ведущая роль во многих из этих и последующих работ принадлежит выдающемуся ученому и конструктору С.П. Королеву. Значительный вклад в развитие космонавтики внесли также конструкторы Г.Н. Бабакин, В.П. Бармин, В.П. Глушко, Д.И. Козлов, В.П. Мишин, Н.А. Пилигин, В.Н. Челомей, М.С. Янгель и др.

Первые межпланетные полеты космических аппаратов

Марсианский проект С.П. Королева

С началом космической эры перед учеными открылись уникальные возможности детального

изучения Солнца, Луны, планет Солнечной системы, астероидов и комет. Практически одновременно с первыми пилотируемыми полетами состоялись запуски автоматических аппаратов к ближайшим небесным телам – Луне, Венере и Марсу. Первый в истории запуск автоматической межпланетной станции «Венера–1» состоялся 12 февраля 1961 г., в 1962 г. стартовала автоматическая станция «Марс–1», положившая начало полетам к Марсу.

В 1962 г. академик С.П. Королев и Президент АН СССР академик М.В. Келдыш утвердили эскизный проект пилотируемой экспедиции на Марс, начало которой намечалось на 1974 год. Была создана трехступенчатая ракета-носитель Н 1 и спроектирован тяжелый межпланетный корабль в составе марсианского пилотируемого космического комплекса [Бугров, 2009]. С 1968 по 1975 г. в ИМБП в макете межпланетного корабля проводились испытания систем жизнеобеспечения. В силу ряда объективных и субъективных причин марсианский проект С.П. Королева не был реализован, но он сохранил свое значение для последующих научно-технических разработок пилотируемых межпланетных экспедиций.

Предпосылки пилотируемой марсианской экспедиции

В настоящее время имеются весомые предпосылки для реализации в будущем пилотируемого полета на Марс. Среди них – обширный опыт медико-биологического обеспечения (МБО) длительных околоземных полетов; знания о природе Марса, полученные с помощью автоматических аппаратов; полеты астронавтов на Луну по программе «Аполлон»; современный уровень космической биологии и медицины, телемедицины, ракетно-космических технологий, дальней космической связи, и робототехники.

Большое значение для подготовки пилотируемого полета на Марс имеют многолетние исследования этой планеты автоматическими орбитальными аппаратами и марсоходами, благодаря которым получена ценная научная информация об истории и природе Марсе, включающая данные по ареологии, климату, погоде, составу атмосферы, свойствах грунта, магнитному полю и радиационной обстановке. Получены подробные карты планеты. Крупным открытием начала XXI в. стало обнаружение на Марсе больших запасов воды, которое было сделано с помощью российского дозиметра нейтронов в 2002 г., установленного на аппарате «Mars-Odyssey» [Mitrofanov et al., 2002].

С марсоходами ученые связывают надежды в поисках признаков прошлой и современной жизни на Марсе. Автоматическим аппаратам отводится также важная роль в выборе мест для посадки людей на планету. В настоящее время на орбите Марса работают аппараты «Mars-Odyssey» (с 2001 г.), «Mars-Express» (с 2003 г.) и «Mars-Reconnaissance» (с 2005 г.). С 2004 г. на поверхности планеты работает марсоход «Opportunity», а с августа 2012 г. обширную программу научных исследований осуществляет марсоход «Curiosity». Его задачей является поиск признаков жизни на Марсе, обнаружение воды и ее следов в минералах, изучение климата, атмосферы и подробные геологические исследования. С помощью установленного на марсоходе российского нейтронного детектора в грунте на глубине 20–30 см были обнаружены следы воды. Найдены глинистые минералы, которые формировались с участием пресной воды. Впервые была определена радиационная обстановка на поверхности планеты.

Подготовка марсианской экспедиции должна максимально учитывать условия на планете, которые стали известны благодаря исследованиям, выполненным с помощью автоматических аппаратов. К основным из них относятся высокий уровень космической радиации (галактические космические лучи, солнечные космические лучи, вторичные нейтроны); гипомагнитная среда (магнитное поле в 500–1000 раз ниже земного); низкое атмосферное давление (в 160 раз ниже, чем на Земле); высокое содержание CO₂ в атмосфере (95%); значительные суточные (с перепадом температур около 60°C) и сезонные колебания температуры (от +27°C до -143°C), пылевые бури.

Разработка системы медико-биологического обеспечения марсианской экспедиции

При создании системы медико-биологического обеспечения (МБО) будут учитываться основные особенности экспедиции на Марс – ее автономность и большая продолжительность, воздействие различных уровней гравитации (от гипергравитации до гипо- и микрогравитации), высокие дозы космической радиации, гипомагнитное поле, искусственная среда обитания, пребывание в ограниченном пространстве, социальная изоляция, запаздывание сигналов при обмене информацией с Землей.

Накопленные данные о состоянии здоровья космонавтов в продолжительных орбитальных полетах и предполагаемое воздействие на орга-

низм комплекса факторов межпланетного полета позволяют прогнозировать основные медико-биологические эффекты, оценивать риски и определять основные проблемы во время марсианской экспедиции. Среди них можно отметить адаптацию к различным уровням гравитации, нарушение функций сенсорных систем и регуляции движений, проявления ортостатической неустойчивости, изменения метаболизма, возможность атрофии мышц и развития остеопороза, высокие психологические нагрузки, нарушения биоритмов, воздействие спектра космической радиации и особенно ее высокоэнергетичных компонентов, влияние гипомагнитной среды, возможность экзобиологических проблем.

Разработка системы МБО марсианской экспедиции потребует проведения широкого спектра научных исследований и испытаний, которые включают:

- медико-биологические исследования и испытания новых средств МБО на МКС;
- наземные модельные исследования в области физиологии, биологии и психологии;
- отработка автономных систем жизнеобеспечения;
- изучение радиобиологических эффектов в экспериментах на ускорителях;
- получение научных данных о механизмах влияния космических факторов на различные организмы в полетах биологических спутников.

Большое значение имеют также лабораторные исследования по выяснению клеточных и субклеточных механизмов реакций на воздействие факторов космического полета. Особое внимание уделяется изучению состояния в условиях микрогравитации обмена веществ и иммунитета, сенсорных нарушений и изменений костной ткани и мышц. В качестве примера можно привести результаты изучения влияния моделируемой микрогравитации (клиностамирование) на развитие мезенхимальных стромальных клеток костного мозга – предшественников остеобластов, формирующих костный матрикс. В исследованиях, проведенных в ИМБП и на факультете фундаментальной медицины МГУ имени М.В. Ломоносова, были определены молекулярные механизмы торможения процессов дифференцировки остеогенных клеток в условиях моделированной микрогравитации (клиностамирование) [Буравкова с соавт., 2010] (рис. 1). При длительной экспозиции отмечено нарушение структуры костного матрикса и его минерализации, которое сопровождается увеличением экспрессии генов, участвующих в пролиферации, адгезии и внутриклеточной сигнализации, и подавлением генов, кодирующих ключевые маркеры остеогенной дифференцировки.

Важное значение имеют исследования сенсорных нарушений в условиях невесомости и изучение возможности управления движениями при этих нарушениях, проведенное специалистами МГУ имени М.В.Ломоносова, ИМБП РАН и Центра подготовки космонавтов [Садовничий с соавт., 2005]. Результатом этой работы стало:

- создание алгоритма имитации условий орбитального полета с использованием математических моделей функционирования вестибулярного аппарата и системы кровообращения;
- разработка аппаратуры, программного обеспечения и методологии для изучения вестибулярной функции, сенсорного взаимодействия и функции зрительного слежения;
- разработка методики так называемого «максиминного» контроля и оценки качества визуально ручной стабилизации управляемых космических объектов;
- создание методики динамической имитации визуально управляемых движений объектов в космосе с учетом функционирования механорецепторов.

В ходе исследования были установлены нарушения позы и локомоций, координации движений глаз и головы, ориентации и контроля точности произвольных движений и намечен поиск путей и средств снижения и купирования отмеченных изменений.

Система профилактики

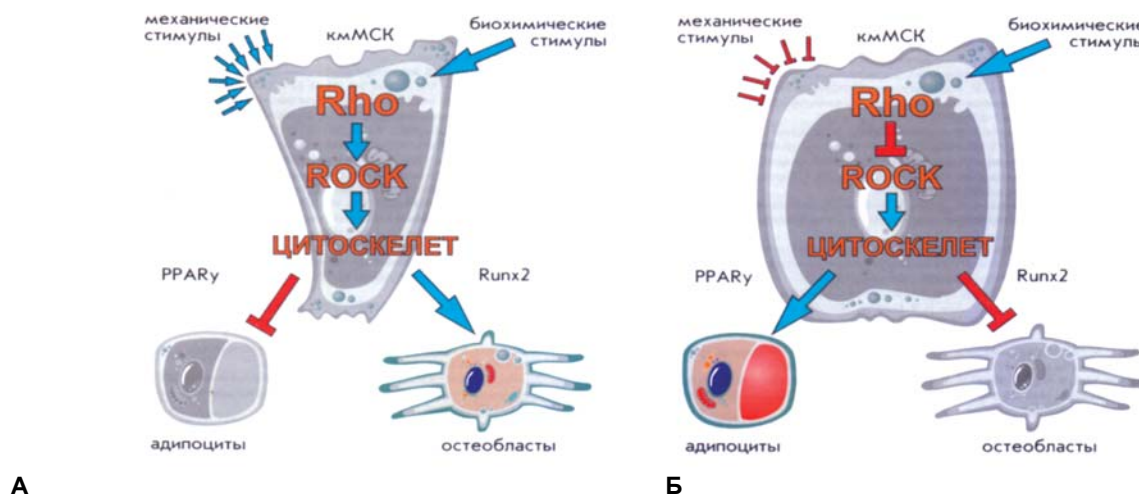
Одной из основных задач МБО в межпланетных и в длительных орбитальных полетах является профилактика негативных эффектов пониженной гравитации. Система профилактики, разработанная для длительных экспедиций на орбитальных станциях, позволяет сохранить приемлемый уровень здоровья и физическую работоспособность космонавтов [Kozlovskaya, Grigoriev, 2004]. В настоящее время в системе профилактики на МКС используются физические упражнения, нагрузочные устройства и костюмы, электромиостимуляция и другие средства, с помощью которых создаются нагрузки на скелетно-мышечную и сердечно-сосудистую системы, активизируются мышечные рецепторы и поддерживаются позные и локомоторные функции (рис. 2). Система профилактики в длительных полетах на МКС постоянно совершенствуется и обновляется, и по существу орбитальная станция становится полигоном для испытаний новых методов профилактики и контроля за состоянием состояния здоровья применительно к полету на Марс.

Следует отметить, что некоторые медицинские проблемы длительных космических полетов полностью не решены. К ним относятся проявления космической болезни движения, нарушения межсенсорного взаимодействия, проявления детренированности сердечно-сосудистой системы и нервно-мышечного аппарата, снижение минеральной плотности костной ткани, изменения водно-солевого обмена, показателей иммунитета и др. [Grigoriev, Egorov, 1992]. Из этого следует, что существующая система профилактики, при всех ее положительных качествах, не может быть рекомендована к использованию в марсианском полете без значительного совершенствования и дополнений [Grigoriev et al., 2002].

Важным дополнением к системе профилактики может стать применение в межпланетных экспедициях искусственной гравитации (ИГ), которая может быть реализована с помощью вращения на центрифуге короткого радиуса. В исследованиях по моделированию невесомости установлено нормализующее влияние искусственной гравитации, в том числе при сочетании с физическими нагрузками, на состояние ряда систем организма человека [Виль-Вильямс, Шульженко, 1980; Котовская с соавт., 1996]. Впервые эффективность применения ИГ величиной 1 g для предотвращения неблагоприятных эффектов невесомости на костную, мышечную и другие системы организма была показана в экспериментах с животными на биоспутнике «Космос-936» [Ильин, 1984] (рис. 3). Вопрос о возможности применения ИГ в марсианском полете потребует выбора оптимальной конструкции бортовой центрифуги и исследований по отработке режимов ее использования [Котовская с соавт., 1996].

Проблемы радиационной безопасности

Радиационная опасность в межпланетных полетах является важным фактором, который затрудняет реализацию пилотируемой экспедиции на Марс. В спектре ионизирующих космических излучений наибольшую опасность для здоровья экипажа представляют тяжелые заряженные частицы галактических космических лучей (ГКЛ), защита от которых является непростой проблемой. При их продолжительном воздействии возможны генные и структурные мутации, возникновение онкологических заболеваний, катаракты и повреждение сетчатки и структур центральной нервной системы [Григорьев с соавт., 2013]. В качестве защиты от ГКЛ предлагаются сокращение продолжительности межпланетных перелетов, нахож-



А **Б**
Рис. 1. Нарушение процессов дифференцировки остеогенных клеток в условиях моделированной микрогравитации. А – образование остеобластов в норме. Б – преобладание адипоцидарной дифференцировки при клиностатировании

дение под надежным слоем грунта в период пребывания на планете и разработка специального магнитного радиационного экрана [Труханов, 2006]. Значительную опасность представляют также мощные солнечные вспышки (протонные события), для защиты от которых потребуются создание радиационного убежища.

Системы жизнеобеспечения

Межпланетные полеты и создание межпланетных баз потребуют новых подходов к обеспечению длительного пребывания человека в искусственной среде обитания, включающих использование физико-химических и биологических регенеративных систем. Важным условием осуществления межпланетного полета является создание надежных систем жизнеобеспечения (СЖО), в первую очередь – регенеративных физико-химических систем с замкнутыми циклами кислорода и воды на основе систем регенерации, которые были отработаны в космических полетах [Гузенберг, 1994; Синяк с соавт., 1994] (рис. 4).

СЖО марсианской экспедиции будет решать следующие задачи: создание и поддержание оптимальных параметров газового состава и физических параметров атмосферы; обеспечение экипажа водой и пищевыми продуктами; обеспечение микробиологической безопасности и нормальных санитарно-гигиенических условий. Главными особенностями системы жизнеобеспечения для пилотируемого полета на Марс должны быть ее автономность и надежность в условиях продолжительного функционирования.

В первой пилотируемой экспедиции предпочтение будет отдаваться СЖО на основе регенерационных физико-химических процессов, эффективность и надежность которых подтверждена опытом их эксплуатации ОС «Салют», «Мир» и МКС, с элементами биологического круговорота веществ в виде овощной оранжереи, учитывающей опыт выращивания высших растений в экспериментальных оранжереях на борту орбитальных станций [Сычев с соавт., 2003].

Для длительного пребывания на Марсе требуется разработка гибридных СЖО, в которых будут сочетаться преимущества физико-химических и биологических компонентов СЖО (рис. 5), а также использоваться ресурсы планет (вода, грунт и т.д.). Экспериментально установлено, что условия космического полета не являются препятствием для осуществления высшими растениями нормального цикла онтогенетического развития. В невесомости возможны рост и развитие растений в ряду последовательных поколений при отсутствии генетических изменений [Сычев с соавт., 1999].

Показана возможность эмбриогенеза птиц (японский перепел) в невесомости, получены нормально развитые жизнеспособные птенцы из яиц, оплодотворенных на Земле и экспонированных на борту орбитальной станции [Мелешко с соавт., 1999].

Наряду с этим экспериментально установлена возможность использования водорослей и рыб при формировании биологической системы жизнеобеспечения СЖО [Левинских, Сычев, 1989].

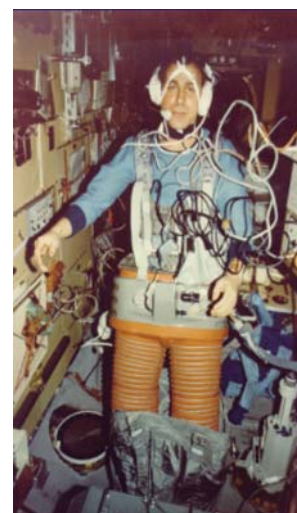
Среди не решенных в настоящее время технологических проблем жизнеобеспечения в межпланетных пилотируемых полетах следует назвать



1



2



3



4



5



6



7



8

Рис. 2. Основные средства профилактики, применяемые на МКС. 1 – силовой нагрузатель. 2 – костюм постоянного ношения «Пингвин». 3 – комплект «Чибис». 4 – велоэргометр. 5 – корректор опорной разгрузки. 6 – электромиостимулятор низкочастотный. 7 – беговая дорожка. 8 – противоперегрузочный костюм «Кентавр»



А



Б

Рис. 3. Центрифуги короткого радиуса. А – бортовая центрифуга на биоспутнике «Космос -936». Б – лабораторная центрифуга в ИМБП РАН



А



Б



В

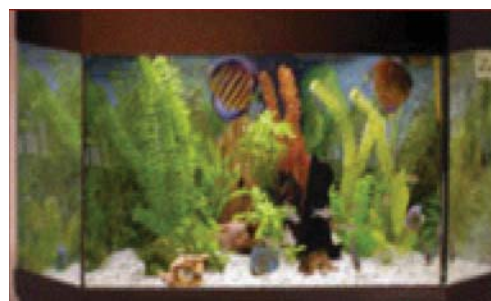
Рис. 4. Компоненты СЖО орбитальных станций. А – Система регенерации воды из мочи. Б – Система регенерации воды из конденсата атмосферной влаги. В – Система генерирования кислорода из воды



А



Б



В

Рис. 5. Компоненты биологической СЖО. А – растения, выращенные в космической оранжерее. Б – японский перепел – гетерогенное звено БСЖО. В – водная система «водоросли – бактерии – рыбы»

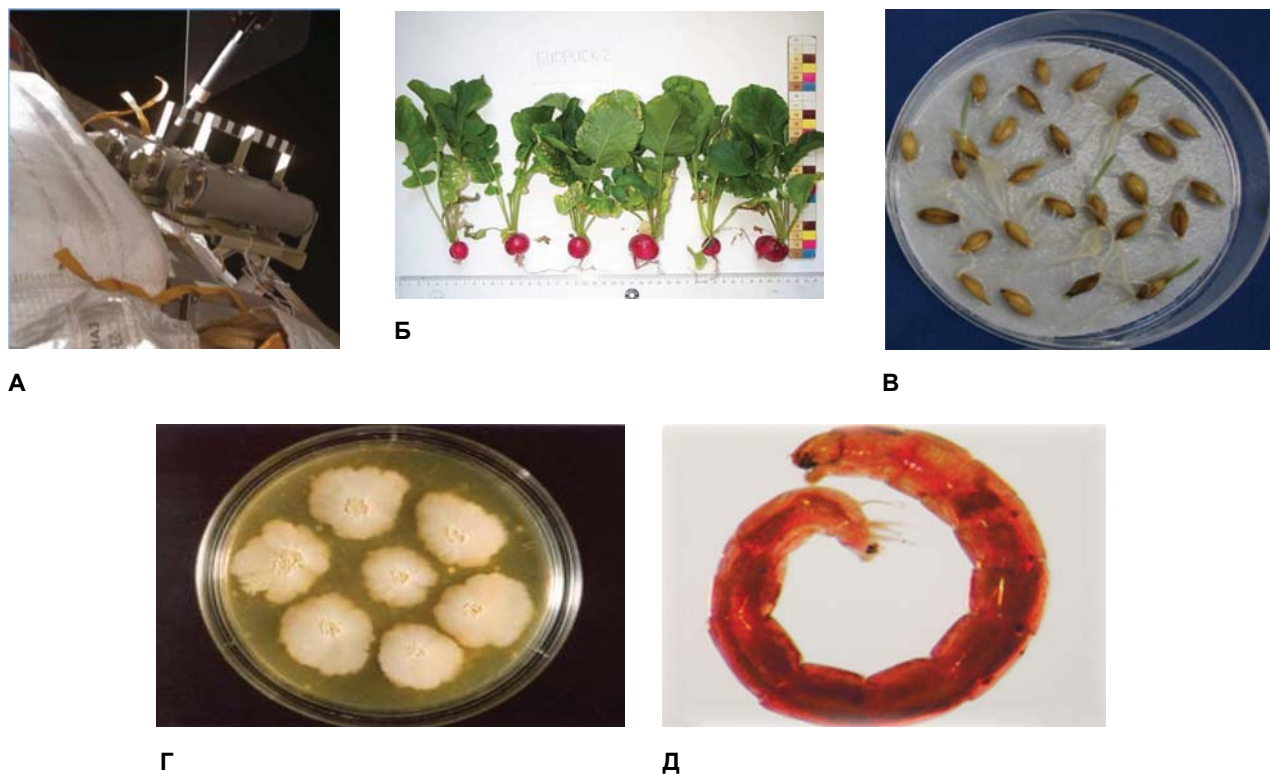


Рис. 6. Выживаемость биообъектов после экспозиции в открытом космосе. А – аппаратура «Биориск» на стыковочном узле МКС. Б – растения редиса *Raphanus sativus*, выросшие из «космических» семян. В – проросшие «космические» семена ячменя *Hordeum vulgare* cv. Г – рост штамма *Bacillus subtilis* после 31-месячной экспозиции спор в открытом космосе. Д – личинка хирономиды *Polypedilum vanderplanki*, реактивированная после 31-месячной экспозиции на внешней стороне МКС



А



Б

Рис. 7. Эксперимент «Марс-500» в ИМБП РАН. А – наземный экспериментальный комплекс. Б – участники эксперимента

необходимость увеличения степени замкнутости циклов регенерации воды и кислорода на основе реакций Сабатье или Боша, разработку мониторинга качества среды обитания по физико-химическим, токсикологическим и бактериологическим показателям, создание технологий обеззараживания, консервации и трансформации физиологических и бытовых отходов.

Исследования выживаемости организмов в космической среде

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям выживаемости микроорганизмов и покоящихся форм других организмов в условиях «открытого» космоса. Показано, что при длительной экспозиции на внешней стороне МКС (18 и 31 месяц) в экстремальных условиях космического пространства споры микроорганизмов и покоящиеся формы других организмов более высокого эволюционного уровня (семена высших растений, личинки комаров, яйца низших ракообразных) сохраняют жизнеспособность [Новикова с соавт., 2007] (рис. 6). Эти данные представляют большую важность при формировании концепции планетарной защиты и экзобиологии, а также для решения вопроса о происхождении жизни. В этой связи нельзя не вспомнить высказывание академика В.И. Вернадского: «Перед биологией сейчас открываются широкие новые горизонты искания. Если подтвердится, что жизнь есть не планетное, а космическое явление, последствия этого для биологических и гуманитарных концепций будут чрезвычайными» [Вернадский, 1993].

Исследования по космической психологии

При подготовке марсианской экспедиции большое внимание будет уделено вопросам психологии. На психическое состояние космонавтов в условиях межпланетной экспедиции будут оказывать влияние гипокинезия, невесомость и гипогравитация, сенсорная депривация, пребывание в ограниченном пространстве, монотония, автономность и социальная изоляция, межличностные отношения. Воздействие этих факторов может приводить к астенизации, нарушениям сна, снижению качества профессиональной деятельности, межличностным конфликтам и потребует создания эффективной системы психологического обеспечения и поддержки членов экипажа.

При оценке психофизиологического состояния космонавтов возрастает роль инструментальных методов диагностики. Удачным примером та-

кого подхода является использование бортового психодиагностического комплекса-тренажера «Пилот», задачами которого являются поддержание профессиональных навыков космонавта-оператора, обучение новым алгоритмам управления, динамическая оценка эффективности обучения и определение «психофизиологической цены» деятельности [Сальницкий с соавт., 2002].

Моделирование пилотируемого полета на Марс

Важным этапом подготовки МБО марсианской экспедиции стал эксперимент «Марс-500» по моделированию пилотируемой экспедиции на Марс в условиях изоляции и ограниченного пространства, проведенный в ИМБП РАН в 2010–2011 гг. (рис. 7).

Основными задачами эксперимента являлись:

- отработка новых принципов, методов и средств отбора, контроля, профилактики, диагностики и прогнозирования уровня здоровья и работоспособности;
- совершенствование методов оказания медицинской помощи, в том числе с использованием средств телемедицины;
- оптимизация системы психологического отбора и подготовки интернациональных экипажей, отработка методов контроля и управления работой операторов;
- отработка средств МБО при моделировании деятельности экипажа на поверхности Марса;
- испытания новых технологий СЖО и БСЖО.

Научная программа эксперимента включала психологические и психофизиологические, клинические, физиологические, санитарно-гигиенические, микробиологические и операционно-технологические исследования. Значительный массив полученных данных потребует углубленной оценки и анализа. Первое обсуждение результатов экспериментов, которое состоялось на Международном симпозиуме в РАН в апреле 2012 г., свидетельствует об интересных результатах проведенных исследований. В качестве примера можно привести данные об изменении врожденного иммунитета, который реализуется с участием моноцитов. В ходе эксперимента было выявлено значительное снижение числа моноцитов, экспрессирующих сигнальные клеточные рецепторы TLR (toll-like receptors) (рис. 8) [Моруков с соавт., 2013]. Следует также отметить работу специалистов МГУ, ИМБП и Центра «Биоинженерия», в которой было

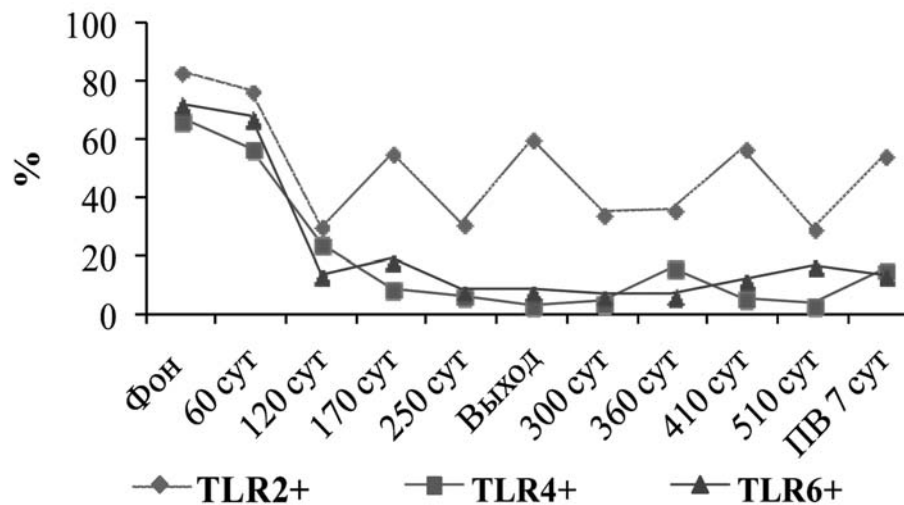


Рис. 8. Снижение процентного содержания в периферической крови моноцитов, экспрессирующих на своей мембране сигнальные образ-распознающие рецепторы – TLR [цит. по: Моруков с соавт., 2013]

установлено изменение состава микробиоты без смены ее энтеротипа, отмечен индивидуальный характер изменений и устойчивости к стрессу [Шестаков с соавт., 2012].

Психологические исследования в эксперименте «Марс-500» показали, что в условиях автономной деятельности экипажа повышается инициатива и творческая активность к самореализации. В двух специально организованных нештатных ситуациях установлена хорошая подготовка экипажа и способность активно и адекватно действовать в стрессовых ситуациях. В эксперименте была разработана виртуальная модель деятельности «на поверхности планеты», позволяющая тренировать профессионально важные навыки и проводить оперативную оценку психической работоспособности оператора. В начальный период выхода «на поверхность Марса» выявлен высокий уровень мотивации его участников, которая в дальнейшем снижалась и сопровождалась проявлениями признаков астенизации. Эти исследования проводились с участием сотрудников факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова.

Основные итоги эксперимента «Марс-500»:

1. Проведены испытания новых методов и средств отбора и подготовки экипажа, медицинского и психологического контроля, профилактики, лечения и реабилитации.
2. Отработаны схемы деятельности международного экипажа с учётом группового и межкультурального взаимодействия.

3. Проведена апробация информационной системы медико-биологического обеспечения, в том числе средств и методов телемедицины.
4. Испытаны и отобраны некоторые новые системы и средства обеспечения жизнедеятельности в замкнутом объеме с искусственной средой.
5. Разработанная и апробированная система МБО обеспечила высокий уровень работоспособности экипажа и выполнение научной программы [Григорьев с соавт., 2012].

Результаты проведенного эксперимента позволили подготовить предложения для нового проекта «МКС-Марс-500» по созданию специализированного медицинского модуля в составе Российского сегмента МКС.

Задачами исследований в данном модуле были:

- испытания методов и средств МБО для межпланетного полёта;
- испытание прототипа автономного медицинского центра межпланетной экспедиции;
- апробация перспективных систем жизнеобеспечения и новых средств мониторинга среды обитания;
- изменение алгоритма управления полетом с передачей экипажу большей автономии в управлении и принятии решений;
- проведение широкого спектра медико-биологических и психофизиологических исследований.

Заключение

Пилотируемая экспедиция на Марс поддерживается национальными космическими агентствами, крупными учеными и широкими слоями населения разных стран. Подготовка и осуществление полета на Марс явится мощным стимулом для развития космонавтики и может стать локомотивом научно-технического прогресса. Ученые будут иметь возможность получить уникальные данные в области сравнительной планетологии и, может быть, смогут обнаружить признаки настоящей или прошлой жизни на Марсе, что позволит приблизиться к решению важнейшей задачи о происхождении жизни. Осуществление марсианской экспедиции позволит строить планы освоения этой планеты и будет способствовать укреплению веры человечества в свои творческие возможности. Специалисты, занимающиеся подготовкой пилотируемого полета на Марс, хорошо отдают себе отчет в стоящих перед ними сложнейших проблемах и настойчиво ищут пути для их решения. Условием успеха на этом пути является тесное сотрудничество специалистов различных областей науки и техники и, безусловно, международная кооперация.

Библиография

- Бугров В.Е. Марсианский проект С.П. Королева. М.: Фонд «Русские витязи», 2009. 316 с.
- Буравкова Л.Б., Гершович П.М., Гершович Ю.Г., Григорьев А.И. Механизмы гравитационной чувствительности остеогенных клеток-предшественников // *Acta Naturae*, 2010. Т. 2. № 1. С. 30–39.
- Вернадский В.И. Жизнеописание. Избранные труды. Воспоминания современников. Суждения потомков // *Начало и вечность жизни*. М.: Современник, 1993. С. 310–347.
- Виль-Вильямс И.Ф., Шульженко Е.Б. Реакция сердечно-сосудистой системы в условиях сочетания воздействия 28-суточной иммерсии, вращений на центрифуге короткого радиуса и физической нагрузки на велоэргометре // *Космическая биология и медицина*, 1980. Т. 14. № 2. С. 42–45.
- Газенко О.Г., Шаров В.Ю. Притяжение космоса. М.: Издательство «РТССофт», 2011. 256 с.
- Григорьев А.И., Красавин Е.А., Островский М.А. К оценке риска биологического действия галактических тяжелых ионов в условиях межпланетного полета // *Российский Физиологический журнал им. И.М. Сеченова*, 2013. Т. 99. № 3. С. 273–280.
- Григорьев А.И., Ушаков И.Б., Моруков Б.В. К первым итогам международного мегаэксперимента «Марс-500». Пилотируемые полеты в космос // *ФГБУ «НИИ ЦПК им. Ю.А. Гагарина»*, 2012. № 3. С. 5–15.
- Гузенберг А.С. Регенерация и кондиционирование воздуха // *Обитаемость космических летательных аппаратов. Космическая биология и медицина*. М., 1994. Т. II. С. 252–295.
- Ильин Е.А. Исследования на борту биоспутников «Космос» // *Космическая биология и авиакосмическая медицина*, 1984. Т. 18. № 1. С. 57–66.
- Котовская А.Р., Шипов А.А., Виль-Вильямс И.Ф. Медико-биологические аспекты создания искусственной тяжести. М.: Слово, 1996. 204 с.
- Левинских М.А., Сычев В.Н. Рост и развитие одноклеточных водорослей в условиях космического полета в составе экосистемы «альгобактериальный ценоз рыбы» // *Космическая биология и авиакосмическая медицина*, 1989. Т. 23. № 5. С. 32–35.
- Мелешко Г.И., Шепелев Е.Я., Гурьева Т.С., Бодя К., Сабо В. Эмбриональное развитие птиц в условиях невесомости // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 1991. Т. 25. № 1. С. 37–39.
- Моруков Б.В., Рыкова М.П., Антропова Е.Н., Берендева Т.А., Моруков И.Б., Пономарев С.А. Иммунологические аспекты пилотируемого марсианского полета // *Физиология человека*, 2013. Т. 3. № 2. С. 1–12.
- Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А., Дешевая Е.А., Свищунова Ю.В., Григорьев А.И. Результаты исследований в эксперименте по длительному экспонированию микроорганизмов в условиях открытого космоса // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2007. Т. 41. № 2. С. 14–20.
- Садовничий В.А., Григорьев А.И., Александров В.В. Роль вестибулярной функции в визуальном управлении космическими объектами и ее моделирование на динамическом стенде // *Технологии живых систем*, 2005. Т. 2. № 1–2. С. 5–10.
- Сальницкий В.П., Мясников В.И., Бобров А.Ф., Шевченко Л.Г., Дудукин А.В. Исследование надежности деятельности космонавтов на различных этапах длительного космического полета (эксперимент «Пилот») // *Орбитальная станция «Мир». Космическая биология и медицина*. М.: ИМБП, 2002. Т. 2. С. 285–299.
- Синяк Ю.Е., Гайдадымов В.Б., Скуратов В.М., Зауер Р.Д., Муррей Р.У. Водобеспечение экипажей // *Обитаемость космических летательных аппаратов (Космическая биология и медицина)*. М., 1994. Т. II. С. 337–374.
- Сычев В.Н., Левинских М.А., Шепелев Е.Я., Подольский И.Г. Биологические процессы регенерации среды обитания в системе жизнеобеспечения экипажей марсианской экспедиции // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 2003. Т. 37. № 5. С. 64–70.
- Сычев В.Н., Шепелев Е.Я., Мелешко Г.И., Гурьева Т.С., Левинских М.А., Подольский И.Г., Дадашева О.А., Попов В.В. Биологические системы жизнеобеспечения. Исследования на борту орбитального комплекса «Мир» // *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 1999. Т. 33. № 1. С. 10–16.
- Труханов К.А. Параметры поля магнитной защиты от галактических космических лучей в межпланетных полетах // *Актуальные вопросы межпланетных экспедиций: Мат. научно-техн. конф. (Москва, 3-5 октября 2006)*. С. 201–203.
- Шестаков С.В., Бабыкин М.М., Григорьев А.И., Зинченко В.В., Кирпичников М.П., Коробан М.В., Мазур А.М.,

Новикова Н.Д., Прохончуков С.Б., Равин Н.В., Скрябин К.Г. Изменение динамики состава кишечной микробиоты участников экипажа «Марс-500» // Сб. мат. Междунар. симпозиума по результатам эксперимента, моделирующего пилотируемый полет на Марс (МАРС-500). М., 2012. С. 76.

Grigoriev A.I., Egorov A.D. Physiological aspects of adaptation of main human body systems during and after space flight // *Advances in space biology and medicine*. JAI Press Inc., Greenwich, Connecticut, London, England, 1992. Vol. 2. P. 44–82.

Grigoriev A.I., Kozlovskaya I.B., Potapov A.N. Goals of biomedical support to a martian mission and possible

approaches to achieving them // *Aviat. Space and Environ. Med.*, 2002. Vol. 73. N 4. P. 379–384.

Kozlovskaya I.B., Grigoriev A.I. Russian system of countermeasures on board of the International Space Station (ISS): the first results // *Acta Astronaut.*, 2004. Vol. 55. P. 233–237.

Mitrofanov I., Anfimov D., Kozyrev A., Linvak M., Sanin A., Tret'yakov V., Krylov A., Schevtsov V., Boynton W., Shinohara C., Saunders I.S. Maps of subsurface hydrogen from the high energy neutron detector, Mars Odyssey // *Science*, 2002. Vol. 297. N 5578. P. 78–81.

Контактная информация:

Григорьев Анатолий Иванович: e-mail: grigoriev@pran.ru;

Потанов Анатолий Николаевич: e-mail: potapov@imbpb.ru.

BIOMEDICAL ISSUES OF MANNED MISSION TO MARS

A.I. Grigoriev^{1,2}, A.N. Potapov²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of fundamental medicine, Department of ecological and extreme medicine, Moscow*

² *Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

The history of space research numbers several thousand centuries as evidenced by the existence of observatories in ancient seats of civilization. Already in those remote times myths were created about humans travelling to other planets of the Solar system. Scientific astronomy arose with the use of telescope at the threshold of the 17th century and, with development, advanced our knowledge of Mars significantly. Conception and formation of theoretical and practical cosmonautics fell on end of the 19th and the 20th century.

The revolutionary progress in studying objects of the Solar system came with the dawn of the space era. Development of cosmonautics headed on along two lines, piloted near-Earth flights and robotic missions to other planets. These were paralleled by working up projects of human flights to the Moon and Mars. There is now a solid scientific and technological background for making a piloted mission to Mars. Russia, USA and Europe are carrying on mega science projects thus paving the way for a future Mars exploration mission. A prominent place in these endeavors is occupied by the issues of biomedical support with consideration of the effects of multiple factors on the functioning of major body systems and psychological status of the crew. Much attention is also given to upgrading methods of selection for cosmonauts, protection against gravitational effects and space radiation, designing independent regenerative systems of life support, housekeeping and hygiene supplies and planetary quarantine program.

Research and design efforts to this end are performed using, first and foremost, the settings and capabilities of the International space station. A part of the problems is resolved in experiments aboard biological satellites and laboratory model studies, extreme natural environments and specialized ground-based facilities. The last can be exemplified by international project MARS-500 on simulation of a mission to Mars; the project was fulfilled in 2010–2011 at the Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences. It furnished new scientific data and marked an important step toward launching a crew of Mars explorers. The most valuable outcome of MARS-500 was an idea of year-long mission to the International space station for in-flight testing of approaches to and technology of biomedical support in view of the needs of piloted mission to Mars.

Keywords: *background, remote space mission, piloted mission to Mars, biomedical support objectives, issues and prospect of piloted exploration mission*