

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*А. Н. ИНЮШКИН, Е. М. ИНЮШКИНА,
А. А. ИНЮШКИН*

ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 06.04.01 Биология

САМАРА

Издательство Самарского университета
2024

УДК 612(075)+613.693(075)

ББК Е707.3я7+Р87я7

И748

Рецензенты: д-р биол. наук, проф. О. Н. Макарина,
д-р мед. наук, проф. В. Ф. Пятин

Инюшкин, Алексей Николаевич

И748 **Основы космической физиологии и медицины:** учебное пособие / *А. Н. Инюшкин, Е. М. Инюшкина, А. А. Инюшкин.* – Самара: Издательство Самарского университета, 2024. – 172 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-2052-6

В пособии систематизированы современные знания в области космической физиологии и медицины. Отдельные главы посвящены особенностям функционирования сенсорных систем, регуляции позы и движений, когнитивным процессам, памяти, обработке информации, функциям сердечно-сосудистой системы, состоянию костно-мышечной системы, психосоциологическим аспектам, особенностям циркадианных ритмов, сна и работоспособности, медицинским проблемам, возникающим в условиях космического полета.

Предназначено для обучающихся биологических факультетов вузов, а также для широкой аудитории читателей.

Подготовлено на кафедре физиологии человека и животных.

УДК 612(075)+613.693(075)

ББК Е707.3я7+Р87я7

ISBN 978-5-7883-2052-6

© Самарский университет, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Введение | 6 |
| Глава 1. Введение в космическую физиологию и медицину | 8 |
| 1.1. Предмет космической физиологии и медицины..... | 8 |
| 1.2. Основные задачи космической физиологии и медицины... | 9 |
| 1.3. Прикладные аспекты космической физиологии..... | 11 |
| 1.4. Факторы космического полета..... | 12 |
| 1.5. Важнейшие вехи истории космонавтики | 19 |
| Глава 2. Сенсорные системы в условиях | |
| космического полета..... | 28 |
| 2.1. Вестибулярная система в условиях космического | |
| полета..... | 28 |
| 2.2. Зрительная система в условиях космического полета..... | 32 |
| 2.3. Слуховая система в условиях космического полета | 37 |
| 2.4. Обонятельная и вкусовая системы в условиях | |
| космического полета | 40 |
| 2.5. Проприоцептивная система в условиях | |
| космического полета | 41 |
| Глава 3. Влияние космического полета на позу | |
| и движения | 44 |
| 3.1. Поза в условиях космического полета в покое..... | 44 |
| 3.2. Вестибулоспинальные рефлексы в условиях | |
| космического полета | 45 |
| 3.3. Движения в условиях космического полета | 48 |
| 3.4. Движения глазных яблок в условиях космического | |
| полета..... | 52 |
| Глава 4. Влияние космического полета на когнитивные | |
| процессы, память, обработку информации | 57 |
| 4.1. Навигация в условиях космического полета | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2. Мысленное вращение предметов в условиях космического полета | 59 |
| 4.3. Ментальная репрезентация в условиях космического полета | 61 |
| Глава 5. Влияние космического полета на сердечно-сосудистую систему | 65 |
| 5.1. Функции сердечно-сосудистой системы при взлете космического корабля | 66 |
| 5.2. Функции сердечно-сосудистой системы на ранней стадии космического полета | 67 |
| 5.3. Функции сердечно-сосудистой системы на следующих стадиях космического полета | 71 |
| 5.4. Функции сердечно-сосудистой системы после возвращения из космического полета..... | 75 |
| Глава 6. Влияние космического полета на костно-мышечную систему..... | 78 |
| 6.1. Атрофия мышц в космическом полете..... | 78 |
| 6.2. Изменения костной ткани в космическом полете | 83 |
| Глава 7. Психосоциологические аспекты пребывания в условиях космического полета | 89 |
| 7.1. Психосоциологические особенности реакций на условия космического полета..... | 89 |
| 7.2. Принципы отбора членов экипажа для космического полета | 98 |
| 7.2.1. Индивидуальный отбор членов космического экипажа | 98 |
| 7.2.2. Формирование команды | 103 |
| 7.3. Психологические тренировки и психологическая поддержка в космическом полете | 104 |

| | |
|--|-----|
| Глава 8. Циркадианные ритмы, сон и работоспособность в условиях космического полета | 118 |
| 8.1. Циркадианные ритмы в космосе | 121 |
| 8.2. Особенности сна в условиях космического полета..... | 130 |
| 8.3. Влияние факторов космического полета на циркадианные ритмы и сон..... | 138 |
| Глава 9. Основные медицинские проблемы пребывания в космосе и борьба с ними | 142 |
| 9.1. Синдром космической болезни укачивания (SMS: space motion sickness)..... | 142 |
| 9.2. Ортостатическая непереносимость..... | 149 |
| 9.3. Атрофия мышц | 156 |
| 9.4. Деминерализация костей | 160 |
| Библиографический список | 168 |

ВВЕДЕНИЕ

Космическая физиология и космическая медицина часто рассматриваются как две дисциплины, входящие в систему космических наук о жизни. При этом космическая физиология представляется более теоретическим направлением, а космическая медицина – более практическим. Космическая физиология ставит своей основной целью изучение изменений, возникающих в физиологических системах организма в условиях космического полета, при подготовке к нему и в послеполетный период. Космическая физиология пытается охарактеризовать механизмы адаптивных реакций на факторы космического полета, особенно на микрогравитацию. Космическая медицина пытается решить медицинские проблемы, встречающиеся во время космических полетов. Эти проблемы возникают непосредственно в полете, в ответ на воздействие факторов окружающей среды (таких как микрогравитация, радиация, температура, давление и др.), либо проявляются в виде дезадаптивных изменений после возвращения на Землю (например, потеря костной массы). Космическая физиология и медицина обеспечивают необходимые знания для дальнейшего эффективного освоения космического пространства.

Представленное учебное пособие впервые использовалось для подготовки студентов магистратуры Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, обучающихся по курсу «Основы космической физиологии и медицины». В нем отражен уровень наших знаний о космических науках о жизни в начале 21 века, а также обращается внимание на недостающие знания, необходимые для обеспечения безопасных

полетов профессиональных космонавтов и космических туристов, включая длительные космические миссии. Настоящее учебное пособие предназначено для широкого круга студентов, интересующихся проблемами космической биологии и медицины, а также для специалистов, работающих в области космических наук о жизни.

Глава 1. ВВЕДЕНИЕ В КОСМИЧЕСКУЮ ФИЗИОЛОГИЮ И МЕДИЦИНУ

1.1. Предмет космической физиологии и медицины

Физиология и медицина являются специализированным разделом наук о жизни, занимающихся изучением живой материи, начиная от бактерий и растений до человека, включая их происхождение и эволюцию, строение, особенности функционирования и их природные связи. Физиология как наука о функционировании живого организма и его частей, а также о взаимодействии организма с окружающей средой, является одной из базовых наук, входящих в комплекс наук о жизни. С началом освоения космического пространства в качестве особого раздела физиологии сформировалась космическая физиология, изучающая механизмы регуляции, адаптации и компенсации функций в условиях воздействия на организм всей совокупности факторов космического полета. С космической физиологией тесно связана космическая медицина – область медицины, изучающая особенности жизнедеятельности человека в условиях космического полета с целью разработки средств и методов сохранения здоровья и работоспособности членов экипажа космических кораблей и станций. Таким образом, космическая физиология рассматривает фундаментальные вопросы, касающиеся механизмов влияния факторов космического полета на жизненные процессы. Космическая медицина – более прикладная наука, направленная на обеспечение здоровья и благополучия космонавтов. Эти научные дисциплины дополняют друг друга и составляют основу космических наук о жизни.

1.2. Основные задачи космической физиологии и медицины

Космическая физиология и медицина решают целый комплекс задач. Прежде всего, приобретаются новые фундаментальные знания в области клеточной биологии и физиологии человека. Уникальные условия космической лаборатории, где отсутствует ощущение гравитации, позволяет исследовать клеточные и молекулярные механизмы, участвующие в восприятии силы гравитации всего порядка $10^{-3} g$ и в последующем преобразовании этого стимула в нервные или гормональные сигналы. При этом исследователи пытаются найти ответы на целый ряд вопросов. Как отдельные клетки воспринимают гравитацию? Каков порог восприятия? Каковы физиологические механизмы, опосредующие реакцию на гравитацию? Как влияет микрогравитация на эмбриональное развитие и долгосрочную эволюцию живого организма? Одним из перспективных подходов в таких исследованиях является изучение физиологических, биохимических и поведенческих показателей нескольких последовательных поколений животных, выросших при отсутствии силы тяжести. Характеристика последовательных стадий жизненного цикла репрезентативных образцов в таких исследованиях имеет принципиальное значение для биологии.

Важнейшей задачей космической физиологии и медицины является сохранение здоровья космонавтов. Глубокое понимание механизмов влияния гравитации на физиологические функции человека имеет огромное практическое значение для пилотируемых космических полетов. Например, процесс деминерализации костей, наблюдающийся у людей и животных во время космического полета, представляет собой не только серьезную медицинскую проблему. Возникает вопрос об аномалиях развития костей и отолитов внутреннего уха у особей, развивающихся в отсутствие

гравитации. Изучение таких аномалий должно дать представление о процессе биоминерализации и регуляции транскрипции соответствующих генов.

Особой задачей является разработка специфических технологий, имеющих непосредственное отношение к космической физиологии. В частности, перспективы развития космонавтики предполагают необходимость поддерживать здоровье и функциональную активность космонавтов в течение года и более для выполнения продолжительных полетов и пребывания на поверхности внеземных космических объектов. При этом предполагается, что продукты питания будут производиться на месте. Эксперименты, выполняемые в условиях длительных космических миссий, должны показать, какие именно источники пищи являются наиболее эффективными для решения данной задачи. Например, в настоящее время космонавты пытаются выяснить, могут ли соевые бобы прорасти, нормально развиваться и производить оптимальный урожай в условиях космического полета для получения продуктов питания и новых семян для обеспечения будущего урожая. Изучение особенностей биологического цикла сои в космическом полете, разработка оборудования для рециркуляции воды и атмосферы, а также переработки отходов важна не только для космонавтики, но и для растениеводства в целом. Отсутствие гравитации используется для устранения микроконвекции при выращивании кристаллов, в электрофорезе и при биохимических реакциях. Полученные продукты могут быть использованы как для научных исследований, так и в коммерческих целях.

Космическая физиология и медицина тесно связаны с физикой, химией, геологией, техническими науками, астрономией. Исследования в области космических наук о жизни не только помогают получать новые знания о функциях человеческого организма и способности жить и работать в космосе, но и исследовать фундаментальные

вопросы о роли гравитации в процессах формирования, эволюции, индивидуального развития и старения в земных условиях.

1.3. Прикладные аспекты космической физиологии

Результаты исследований, выполняемых в рамках космической физиологии и медицины, используются в целом ряде областей современной жизни.

В физиологии:

- с целью улучшения состояния здоровья людей всех возрастов;
- в поиске способов уменьшения количества питательных веществ, площади поверхности и объема пищи;
- с целью поиска новых возможностей физиологии клетки.

В биотехнологии:

- при разработке новых лекарственных препаратов для целенаправленного воздействия на специфические белки и для лечения заболеваний;
- при получении новых культур тканей для использования в онкологических исследованиях, хирургии, пластике костных хрящей, при травмах нервов и др.

В биомедицинских исследованиях:

- для изучения патогенеза костной патологии, в особенности остеопороза;
- при разработке новых методов лечения и профилактики неврологических заболеваний (напр., рассеянного склероза);
- при разработке методов длительного поддержания здоровья в условиях микрогравитации.

В образовании:

- выполнение образовательных программ в области физиологии в условиях космического полета.

1.4. Факторы космического полета

В условиях космического полета на организм действует совокупность факторов, способных вызвать изменения в функционировании физиологических систем:

- невесомость;
- радиация;
- стресс;
- перегрузки;
- отсутствие циркадианных времязадателей;
- длительная изоляция;
- гиподинамия и др.

Невесомость. Наиболее важным среди этих факторов считается невесомость (обычно этот термин используется в качестве синонима термина «*микрогравитация*»). На Земле на все объекты действует гравитационное поле, притягивающее их с силой, обратно пропорциональной расстоянию между объектом и центром Земли. Эта сила соответствует ускорению свободного падения ($9,8 \text{ м/с}^2$) и обычно обозначается как 1 g. Термин «*микрогравитация*» обозначает среду, сообщающую объекту результирующее ускорение, значительно меньшее 1 g. В принципе состояния микрогравитации можно добиться тремя основными способами:

1. Удаление тела далеко в открытый космос, вследствие чего ослабевает гравитационное воздействие других тел;
2. Свободное падение тела;
3. Движение объекта вокруг тела, обладающего гравитацией, по баллистической орбите.

На борту космической станции гравитация может составлять порядка одной миллионной от g («микро» - миллионная часть).

В одной из своих книг Ньютон в 1687 г. представил пушку на вершине очень высокой горы над земной атмосферой, чтобы не было трения ядер о воздух. Допустим, пушка стреляет ядра-

ми параллельно поверхности Земли. Если прогрессивно увеличивать с каждым выстрелом количество пороха, ядра бы летели все дальше. Наконец, если выстрелить из пушки с достаточной энергией, пушечное ядро полностью облетит Землю и начнет вращаться вокруг Земли по орбите (рис. 1.1). Следуя подобным математическим расчетам, можно определить необходимую скорость объекта, вращающегося на околоземной орбите. Например, космический корабль, вращающийся вокруг Земли на высоте 320 км, должен иметь скорость, равную 27 740 км/ч (7,91 км/с).

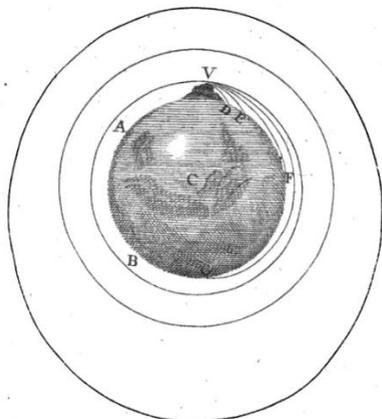


Рис. 1.1. Диаграмма Ньютона

Диаграмма Ньютона показывает траекторию пушечных ядер. Ядро выходит на орбиту вокруг Земли, если его стартовая скорость равна или выше 7,8 км/с. На самом деле первая космическая скорость составляет 7,91 км/с*.

Вторая космическая скорость, которую необходимо придать объекту, стартующему с поверхности Земли для того, чтобы он

* I.S. Newton. Philosophiae naturalis principia mathematica. S. Pepys (ed.). Vol. 3. On the system of the world. Reg. Soc. Praeses, London, 1687. P. 6.

мог покинуть замкнутую орбиту и уйти в космическое пространство, равна 11,2 км/с. Третья космическая скорость, необходимая для покидания пределов Солнечной системы, составляет около 16,6 км/с. Кроме этого, рассчитана четвертая космическая скорость, необходимая для преодоления притяжения галактики. Она составляет приблизительно 550 км/с.

Космическая радиация. Радиацию в космическом пространстве можно условно разделить на два типа: галактическую радиацию и солнечную радиацию.

Галактическая радиация – тяжелые и очень быстрые частицы, проникающие в Солнечную систему извне. Источником являются взрывы сверхновых, произошедшие миллионы лет назад. Тяжелые заряженные частицы поражают все органы человека. На Земле люди защищены от ее губительного воздействия магнитосферой. Солнечная радиация также представляет собой тяжелые частицы, которые возникают во время вспышек на солнце. Воздействие этих частиц не настолько мощное, как у галактической радиации, однако исходящая от них опасность заключается в непредсказуемости выбросов.

Уровень космической радиации на поверхности Земли – около 1 мЗв (миллизиверт) в год, на поверхности Луны – около 1,4 мЗв в сутки, на борту МКС – около 0,54 мЗв в сутки. В ходе планируемого полета на Марс воздействие космической радиации будет составлять около 1,8 мЗв в сутки. С учетом расчетной продолжительности полета на Марс и обратно в 500 суток, суммарное воздействие космической радиации будет составлять около 1000 мЗв за время полета. На поверхности Марса уровень радиации – около 0,7 мЗв в сутки.

Современным российским законодательством для космонавтов установлена предельная норма в 1000 мЗв за карьеру. Эту норму космонавт может набрать за несколько продолжительных полетов на околоземной орбите или за один полет на Марс и обратно. Накопление такой дозы сокращает жизнь человека на 2,5–3

года. Смертельная доза для человека составляет 500 мЗв за одни сутки.

Космический стресс. Стресс определяется как совокупность неспецифических адаптационных реакций организма на воздействие различных неблагоприятных факторов (стрессоров), нарушающее его гомеостаз, физиологическое состояние нервной системы или организма в целом. Физиологический смысл стресс-реакции заключается в развитии в ответ на стрессирующее воздействие защитно-приспособительных реакций организма. Эти реакции, независимо от характера стрессора, происходят с участием нейрогуморальной регуляции путём возбуждения симпатического отдела вегетативной нервной системы, симпатoadреналовой системы, что приводит к секреции адренокортикотропного гормона гипофиза (АКТГ), вызывающего выделение кортикостероидов из коры надпочечников.

Космический стресс отличается тем, что на организм членов экипажа действует целый набор физических и психологических стрессоров. Наряду с такими очевидными стрессирующими факторами как микрогравитация, длительная изоляция, постоянное психологическое напряжение, имеется множество других. Например, на космической станции одновременно работает множество приборов, что приводит к высокому уровню непрерывного раздражающего гула. Монотонность труда по операционному ежедневному обслуживанию техники также угнетающе действует на психику космонавтов. При работе на космическом корабле члены экипажа неминуемо сталкиваются с сенсорной и социальной депривацией. Первая проявляется в хронической нехватке привычных ощущений – визуальных, тактильных, обонятельных, вкусовых. Вторая – в отсутствии эмоционального контакта с родными, близкими, друзьями. К этому добавляется недостаток привычной активности из-за длительной изоляции и колоссальная ответственность за результат миссии.

Перегрузки. В авиационной и космической физиологии и медицине перегрузкой считается показатель величины ускорения, воздействующего на человека при его перемещении. Этот показатель рассчитывается как отношение равнодействующей перемещающих сил к массе тела человека. Перегрузку измеряют в единицах, кратных весу тела на поверхности Земли. Для человека, который находится на земной поверхности, данный показатель равен единице (1 g). К таким условиям человеческий организм приспособился в ходе эволюции, поэтому для людей перегрузка, равная 1 g, незаметна. При старте космического корабля на космонавтов действует перегрузка, величина которой составляет от 1 g до 7 g. По статистике, космонавты редко испытывают перегрузки, превышающие 4 g.

Реакция на перегрузки зависит от их величины, скорости их нарастания, исходного состояния организма и тренированности. В зависимости от этого при перегрузках могут возникать как незначительные функциональные сдвиги, так и тяжелые состояния, такие как нарушения зрения, функций сердечно-сосудистой, дыхательной и нервной систем, вплоть до потери сознания и морфологических изменений в тканях.

С целью повышения устойчивости организма космонавтов к перегрузкам в полете используют специальные противоперегрузочные костюмы, создающие при перегрузках давление на область брюшной стенки и нижние конечности. Это препятствует оттоку крови в нижнюю часть тела и улучшает кровоснабжение головного мозга. Для выработки устойчивости к перегрузкам в предполетный период проводятся тренировки на центрифуге.

Отсутствие циркадианных времяздателей. В организме человека есть собственные биологические часы, генерирующие ритм с периодом около 24 часов – циркадианные биологические часы. Главные циркадианные часы располагаются в супрахиазматическом ядре гипоталамуса и представляют собой нервную сеть из

приблизительно 20 тыс. нейронов, связанных между собой. Эти часы осуществляют регуляцию и синхронизацию множества циркадианных физиологических, биохимических и поведенческих ритмов в других отделах центральной нервной системы, в периферических органах и тканях. Существование эндогенных циркадианных часов дает организму значительное эволюционное преимущество, поскольку позволяет заранее предвидеть наступление ежесуточных повторяющихся событий в окружающей среде (наступление дня и ночи, суточные изменения температуры воздуха, появление пищи и др.).

Таким образом, функция циркадианных биологических часов помогает подстраивать все аспекты физиологии, биохимии и поведения к требованиям внешнего 24-часового мира. Однако, циркадианные часы генерируют собственный эндогенный ритм, период которого может быть отличным от 24 часов как в сторону укорочения, так и в сторону удлинения. Для того, чтобы этот ритм был в точности равен 24 часам, существует совокупность синхронизирующих факторов – времяздателей. Наиболее важным из них считается ежесуточно повторяющийся внешний 24-часовой ритм изменения естественной освещенности, который воспринимается специфическими рецепторами сетчатки – фоточувствительными ганглиозными клетками. Эти клетки посылают информацию по волокнам ретиногипоталамического тракта в супрахиазматическое ядро, и здесь она используется для синхронизации ритмогенерирующей функции циркадианного осциллятора. Существует также множество других времяздателей, в качестве которых могут использоваться суточные изменения температуры, режим приема пищи, колебания уровня шума, ежесуточно повторяющиеся социальные события (например, начало и конец рабочего дня, ежесуточно повторяющиеся телевизионные передачи, время обеденного перерыва и др.). В условиях космического полета исчезает главный времяздателем – 24-часовое ритмическое колебание есте-

ственной освещенности. Многие из оставшихся времязадателей, которые и на Земле играют второстепенную роль, также теряют свое синхронизирующее влияние. Это может приводить к нарушению функции циркадианных часов, что отрицательно влияет на продолжительность и профиль сна, физиологическое и психологическое состояние и производительность членов экипажа.

Длительная изоляция. В условиях космического полета экипаж длительное время (иногда больше года) находится в условиях изоляции в ограниченном пространстве корабля. Кроме физических неудобств, связанных с небольшим объемом доступного пространства, в этих условиях важным отрицательным фактором является социальная изоляция от семьи, друзей, привычной земной обстановки. В этих условиях, несмотря на присутствие других членов экипажа, нелегко сохранять хорошее настроение и мотивацию к работе. Чтобы оставаться в физиологической, эмоциональной и психологической форме в изоляции, космонавты выполняют физические упражнения, правильно питаются, соблюдают график сна и работы, а также находят время для досуга, однако, полностью купировать влияние такого фактора, как изоляция, вряд ли возможно, особенно в условиях продолжительной космической миссии. Один из способов, который помогает переносить изоляцию в космосе - это осознание того, что работа экипажа имеет важное социальное значение.

Гиподинамия. Гиподинамия – это фактор космического полета, который начинает действовать практически с первых минут попадания экипажа в условия микрогравитации. В условиях изоляции космонавтов на космическом корабле в невесомости практически невозможно обеспечить условия для привычной мышечной активности. В особенности сильно снижается нагрузка на постуральные мышечные группы вследствие отсутствия в полете действия земной гравитации. В настоящее время на борту космических станций имеются сложные тренажеры, позволяющие в значительной степе-

ни компенсировать снижение мышечных нагрузок и бороться с гиподинамией, тем не менее, исследования влияния длительного космического полета на мышечную и костную системы показывают, что гиподинамия продолжает оставаться серьезной проблемой космической физиологии и медицины.

1.5. Важнейшие вехи истории космонавтики

Развитие космической физиологии и медицины связано с возникновением и реализацией космических программ и, в особенности, с появлением возможности пребывания в космосе человека. В начале 1950-х годов в СССР, США, Франции предпринимались попытки суборбитальных полетов космических кораблей с животными на борту (обезьяны, собаки, кошки, крысы). Некоторые из этих полетов оказались успешными, и животные вернулись на Землю живыми.

Первый орбитальный полет с животным на борту был осуществлен 3 ноября 1957 года. На борту «Спутника-2» была собака Лайка. Телеметрические данные показывали, что после действий перегрузок, когда Лайка уже оказалась в невесомости, частота пульса восстановилась до почти нормальных значений, двигательная активность стала умеренной, движения непродолжительными и плавными. Но времени для нормализации пульса понадобилось в 3 раза больше, чем в наземных экспериментах. Электрокардиограмма не показала никаких патологических изменений. Лайка была жива в течение 4 витков вокруг Земли. Из-за ошибки расчёта площади спутника и отсутствия системы терморегулирования температура за это время поднялась до 40 °С, и собака умерла от перегрева.

19 августа 1960 года был выполнен полет «Спутника-5» с двумя собаками на борту – Белкой и Стрелкой. Полёт продолжался

более 25 часов. За это время корабль совершил 17 полных витков вокруг Земли. Белка и Стрелка стали первыми животными, которые совершили успешный орбитальный космический полет и вернулись на Землю. Основной целью полёта было исследование влияния на организм животных и других биологических объектов (крысы, мыши, растения, микроорганизмы) факторов космического полёта: перегрузки, длительной невесомости, перехода от перегрузок к невесомости и обратно, космической радиации, мониторинг жизнедеятельности животных, их наследственности, отработка систем, обеспечивающих жизнедеятельность, безопасность полёта и благополучное возвращение на Землю.

В 1960 году в Советском Союзе было объявлено о создании отряда космонавтов из 20 человек, которых набрали из числа летчиков-истребителей. Отбор проводился на основании результатов физиологического и психологического обследования, которое позволило выбрать лучших кандидатов мужчин с «крепкими нервами, лучшими показателями физиологического и эмоционального здоровья». В апреле 1961 года к отряду космонавтов присоединились 5 женщин парашютисток.

12 апреля 1961 года состоялся первый орбитальный полет человека на корабле «Восток-1». Корабль с космонавтом на борту совершил один оборот вокруг Земли. Первым человеком, вышедшим на орбиту Земли, стал Юрий Гагарин (рис. 1.2.). Согласно докладу, во время взлета, на орбите в условиях невесомости, при приземлении и после него Гагарин чувствовал себя хорошо. Однако, отмечалось, что были приняты меры для защиты космонавта от космической радиации. Несмотря на успех полета, в ходе его возникли технические проблемы. Ракета-носитель «Восток» отработала без замечаний, но на завершающем этапе не сработала система радиуправления, которая должна была выключить двигатели 3-й ступени. Выключение двигателя произошло только после срабатывания дублирующего механизма (таймера), но корабль уже под-

нялся на орбиту, высшая точка которой оказалась на 100 км выше расчётной.



Рис. 1.2. Старт космического корабля «Восток-1» с первым космонавтом Земли Юрием Гагариным на борту*

В конце полёта тормозная двигательная установка отработала успешно, но с недобором импульса, так что автоматика выдала запрет на штатное разделение отсеков. В результате в течение 10 минут перед входом в атмосферу корабль беспорядочно кувыркался со скоростью 1 оборот в секунду. Когда корабль вошёл в более плотные слои атмосферы, соединяющие кабели перегорели, а команда на разделение отсеков поступила уже от термодатчиков, после чего спускаемый аппарат наконец отделился от приборно-двигательного отсека. Спуск происходил по баллистической траектории (как и у остальных пяти космических кораблей серий «Восток» и «Восход»), то есть с 8-10-кратными перегрузками, к которым Гагарин был готов. Сложнее было пережить психологические нагрузки – после входа капсулы в атмосферу загорелась обшивка (температура снаружи при спуске достигает 3-5 тысяч °С), по стёклам иллюминаторов потекли струйки расплавленного металла, а сама кабина начала потрескивать.

* Медиабанк РИА Новости. Старт космического корабля «Восток-1» на космодроме Байконур. <https://riamediabank.ru/media/138430.html>

На высоте 7 км в соответствии с планом полёта Гагарин катапультировался, после чего капсула и космонавт стали спускаться на парашютах отдельно. После катапультирования и отсоединения воздуховода спускаемого аппарата, в герметичном скафандре Гагарина не сразу открылся клапан, через который должен поступать наружный воздух, так что космонавт некоторое время испытывал серьёзное затруднение с дыханием. Последней проблемой в этом полёте оказалось место посадки – Гагарин мог опуститься в ледяную Волжскую воду. Космонавту помогла хорошая предполётная подготовка: управляя стропами, он увёл парашют от реки и приземлился примерно в 2 километрах от берега.

12-13 апреля 1961 г. Ю.А. Гагарин проходил послеполётную реабилитацию на даче обкома КПСС Куйбышевской области, которая стала своеобразной резиденцией для будущих космонавтов. Гагарин гулял, проходил послеполётные медицинские обследования (рис. 1.3.).



Рис. 1.3. Ю.А. Гагарин в форме майора авиации на даче обкома КПСС Куйбышевской области 14 апреля 1961 г. Фото Д. Брянова. Из фондов СОИКМ им. П.В. Алабина*

* Фотохроника ТАСС. Фото Д. Брянова. Из фондов СОИКМ им. П.В. Алабина.

18 марта 1965 года был свершен первый выход в открытый космос с борта космического корабля «Восход-2» советского космонавта Алексея Архиповича Леонова. Скафандр «Беркут», в котором космонавт выходил в открытый космос, был вентиляционного типа и был рассчитан на 30 минут работы (рис. 1.4.). Из-за разности давлений скафандр раздувался и сильно мешал движениям космонавта, что, в частности, очень затруднило Леонову возвращение на «Восход-2». Подробности этого полета показаны в фильме «Время первых». Общее время первого выхода составило 23 минуты 41 секунду (из них вне корабля 12 минут 9 секунд), и по его итогам был сделан вывод о возможности человека выполнять различные работы в открытом космосе (рис. 1.4.).



Рис. 1.4. Первый выход в открытый космос А.А. Леонова*

Выходы в открытый космос опасны по множеству различных причин. Первая из них – возможность столкновения с космическим мусором. Типичная орбитальная скорость космического ко-

* Российское историческое общество. Электронная библиотека исторических документов. <https://historyrussia.org/sobytiya/k-godovshchine-pervogo-vykhoda-v-otkrytyj-kosmos-rassekrecheny-novye-dokumenty.html>

рабля составляет примерно 7,7 км/с, что в 10 раз превышает скорость полета пули. Поэтому кинетическая энергия песчинки эквивалентна энергии пули, обладающей в 100 раз большей массой. Кроме этого, потенциальная опасность выходов в открытый космос ведёт к серьезному эмоциональному давлению на космонавта.

Потенциальную опасность несёт возможность потери или недопустимого удаления от корабля, грозящая гибелью из-за израсходования запаса дыхательной смеси. Опасны также возможные повреждения или проколы скафандров, разгерметизация которых грозит смертью от аноксии. Инцидент с повреждением скафандра произошёл только один раз, когда во время полёта американского корабля «Атлантис», когда маленький прут проколел перчатку одного из астронавтов. По счастливой случайности разгерметизации не произошло, т.к. прут застрял и заблокировал собой образовавшееся отверстие. Ещё один потенциально опасный случай произошёл во время выхода в открытый космос астронавтов космического корабля «Дискавери», когда от скафандра астронавта Пирса Селлера неожиданно открепилась лебедка, которая помогает вернуться на станцию и не даёт астронавту улететь в открытый космос. К счастью, поломка была замечена, Селлерс с напарником своевременно смогли прикрепить устройство обратно, и выход в космос был завершён благополучно.

В 1961 году была утверждена программа космического агентства США «Apollo» с целью осуществления пилотируемой высадки на Луну. Программа была успешно реализована и 20 июля 1969 года в ходе полета «Apollo-11» впервые состоялась высадка людей (Нила Армстронга и Базза Олдрина) на Луну (рис. 1.5.). Всего было выполнено 6 успешных высадок астронавтов (12 астронавтов). Последний полет («Apollo-17») по этой программе состоялся в декабре 1972 года. Эти 6 полетов до сих остаются единственными за всю историю человечества, когда люди высаживались на другом астрономическом объекте.

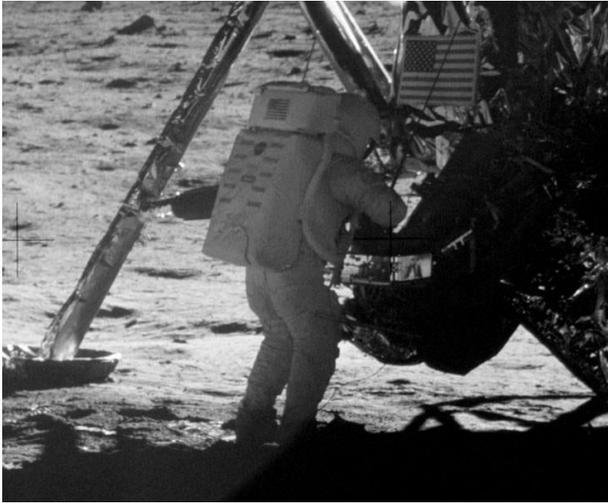


Рис. 1.5. Первая высадка человека на Луну.

Астронавт «Apollo-11» Нил Армстронг ступил на поверхность Луны*

В ходе выполнения программы «Apollo» проводился мониторинг состояния здоровья астронавтов, в том числе и членов экипажа, совершавших высадку на Луну. Перед полетами возникали серьезные опасения специалистов относительно невозможности оказания срочной медицинской помощи членам лунных миссий в случае необходимости. Аварийная ситуация с реальной опасностью для жизни астронавтов возникла лишь однажды (при полете «Apollo-13»), однако и тогда необходимости в срочном медицинском вмешательстве не возникло, и астронавты успешно вернулись на Землю, хотя высадка на Луну была отменена.

В ходе реализации американской лунной программы не было обнаружено существенных отличий физиологических реакций астронавтов от тех, что ранее наблюдались в ходе орбитальных полетов. У астронавтов было выявлено умеренное снижение коли-

* Из архивов NASA: <http://www.hq.nasa.gov/alsj/a11/AS11-40-5886.jpg>

чества эритроцитов в периферической крови, снижение минерализации костной ткани, повышение расхода энергии при выходах на лунную поверхность, снижение показателей двигательной активности в послеполетный период.

С начала 1970-х годов до настоящего времени большинство космических программ реализуется в ходе полетов на космических станциях. Первой космической станцией стал советский «Салют-1», запущенный 19 апреля 1971 года; 14 мая 1973 года была запущена американская «Skylab». Впоследствии вместо национальных космических станций появились МКС (международные космические станции. Первый модуль МКС был запущен 20 ноября 1998 года. Космические станции обладают целым рядом преимуществ, в частности, возможностью длительного пребывания космонавтов и астронавтов на борту (в течение многих месяцев), одновременного пребывания многочисленных членов экипажа, длительного использования станции с подключением новых сегментов.

Выполнение программы физиологических исследований на космических станциях позволило подробно исследовать влияние факторов полета на организм человека. В частности, была выявлена потеря костных минералов, эритропения, симптомы укачивания (тошнота, рвота), проблемы с выполнением визуальных и мануальных заданий, ортостатическая гипотензия, относительно высокие метаболические расходы при выходах в открытый космос, потеря веса и многие другие физиологические и медицинские аспекты длительного пребывания в космосе.

Современный этап развития отечественной космонавтики ознаменовался целым рядом достижений. В июле 2011 г. на орбиту был выведен самый чувствительный в мире радиотелескоп «Радиоастрон». Хотя сравнение оптических и радиотелескопов не является корректным, стоит упомянуть, что угловое разрешение «Радиоастрона» в 2 000 раз выше, чем у знаменитого телескопа «Хаббл». В 90-е годы XX столетия началось развертывание отечественной

глобальной навигационной системы ГЛОНАСС. Основу структуры ГЛОНАСС составляют 24 космических аппарата, которые движутся в трёх орбитальных плоскостях по 8 аппаратов в каждой плоскости. На начало 2023 г. в системе ГЛОНАСС было задействовано 26 космических аппаратов – 23 «Глонасс-М» и 3 «Глонасс-К». Интегральная доступность навигации системы составляет: глобально 99,9%, в России 100% при значении погрешности определения местоположения в 2,64 м. Был построен и запущен в эксплуатацию космодром «Восточный», с которого в 2016 г. начались запуски ракет «Союз-2» лёгкого и среднего классов.

В настоящее время приоритетной задачей космонавтики является подготовка первого в истории пилотируемого полета на Марс. Ранее для исследований Марса использовались автоматические станции. В СССР программа исследований Марса выполнялась в период с 1962 по 1973 год. Была построена серия автоматических станций: «Марс-1» – «Марс-7». Некоторые из них (включая их спускаемые аппараты) достигли поверхности Марса. В США была построена серия автоматических кораблей «Маринер», однако, поверхности Марса они не достигли, хотя некоторые из них стали искусственными спутниками Марса. С 1973 г. начались запуски марсоходов. Первый марсоход – ПроП-М (СССР) в 1973 г. достиг поверхности Марса, но проработал лишь 15 сек. Три марсохода работают до сих пор: «Кьюриосити» (США, 2012 г.), «Персеверанс» (США, 2021 г.) и «Чжужун» (КНР, 2021 г.). Однако, для подготовки пилотируемого полета на Марс необходимо решить множество проблем, в том числе, в области космической физиологии и медицины, т.к. до сих пор полетов на такое расстояние не производилось (около 55 млн км; 250-300 дней в одну сторону).

Глава 2. СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

В процессе адекватного взаимодействия организма с окружающей средой важнейшую роль играют сенсорные системы. Различные свойства среды воспринимаются специализированными рецепторами органов чувств. Сигналы от рецепторов поступают в центральную нервную систему, где происходит их анализ и синтез, возникают ощущения, которые используются для создания образов реальности, планирования и реализации активности, в частности, для координации и организации мышечных сокращений и движений. Для космической физиологии и медицины важными являются данные о влиянии силы тяжести, микрогравитации и других факторов космического полета на функционирование сенсорных систем, в особенности используемых для равновесия и пространственной ориентации. Влияние космического полета на функции сенсорных систем в настоящее время является неоспоримым. Это подтверждается дезориентацией и недомоганием, часто встречающимися во время воздействия микрогравитации и по возвращении на Землю. Выполненные в последние десятилетия экспериментальные космические исследования позволили теоретически описать особенности регуляции позы и осанки, движений глазных яблок, самоориентации при адаптации к изменению гравитации.

2.1. Вестибулярная система в условиях космического полета

Для детального знакомства с анатомией и физиологией вестибулярной системы необходимо внимательно прочесть со-

ответствующий раздел учебника физиологии сенсорных систем (например, Мельник и соавт., 2021 [1], с. 67-75; Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 416-419 и др.).

Среди сенсорных систем организма в условиях космического полета наиболее значительному воздействию подвергается вестибулярная система. Вестибулярная система состоит из рецепторов, воспринимающих ускорение, нервных волокон, передающих эту информацию в спинной и головной мозг, а также специализированных отделов центральной нервной системы, интегрирующих эту информацию.

Вестибулярные рецепторы расположены во внутреннем ухе. Эти рецепторы воспринимают и измеряют линейные и угловые ускорения. Реакции на раздражение вестибулярных рецепторов усложняются и дополнительно интегрируются с сигналами, поступающими от зрительных рецепторов и проприорецепторов (рис. 2.1). В условиях микрогравитации некоторые из этих сигналов видоизменяются, что приводит к неправильной интерпретации сенсорной информации и неадекватным реакциям головного мозга, что проявляется в симптомах космической болезни укачивания (SMS: space motion sickness).

Ответить на вопрос о том, происходят ли изменения на уровне вестибулярных рецепторов в условиях космического полета и в чем заключаются эти изменения, оказалось непростой задачей. Для ответа на этот вопрос предпринимались многократные попытки экспериментального изучения вестибулярных рецепторов животных, отправлявшихся в космос. Эксперименты на борту российской космической станции «Мир» не выявили изменений эпителия вестибулярного органа взрослых, вернувшихся из 8-дневного полета лягушек и их личинок после развития во взрослых животных в условиях микрогравитации. Однако, в экспериментах на корабле «Космос-782» были выявлены изменения

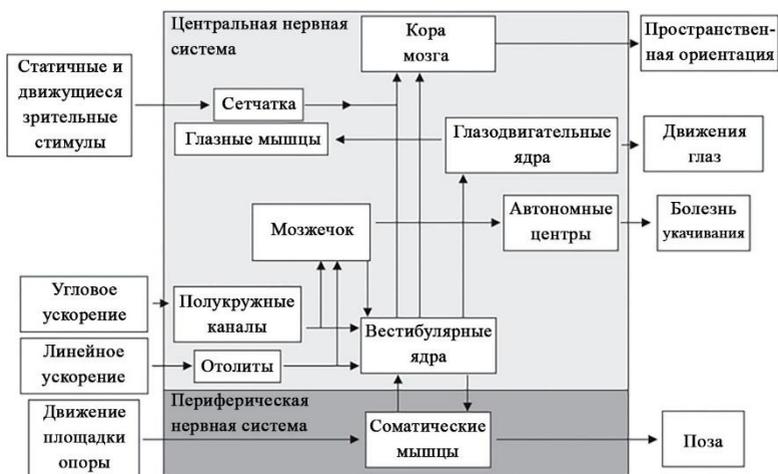


Рис. 2.1. Вестибулорецепторы, зрение, рецепторы кожи, проприорецепторы мышц, связок и сухожилий координированно участвуют в поддержании позы, равновесия и регуляции движений*

отолитового аппарата крыс. Эти изменения заключались в деградации кристаллов, которая могла возникать из-за изменений обмена веществ, прежде всего кальциевого и белкового обмена. Осталось невыясненным, насколько эти изменения были связаны с перегрузками, которые испытывали животные при взлете и посадке. Впоследствии интересные результаты были получены в ходе полетов на американских кораблях. Было обнаружено двенадцатикратное (!) увеличение количества синапсов волосковых клеток макулы крыс, вернувшихся из космического полета, по сравнению с контрольными животными. Эти данные показывают, что зрелые волосковые клетки сохраняют синаптическую пластичность и помогают адаптироваться к условиям полета за счет изменения ко-

* Clement G. Fundamentals of space medicine. Springer, Dordrecht, Netherlands. 2005. 361 p. с изменениями [11].

личества синаптических входов к структурам центральной нервной системы [3].

Информация от волосковых клеток передается в ствол мозга по первичным афферентным волокнам вестибулярного нерва. Импульсная активность в одиночных отолитовых афферентных волокнах лягушек в покое и реакция на центробежное ускорение отличалась в условиях микрогравитации по сравнению с наземными условиями.

Отдельный интерес представляют исследования раннего развития вестибулярной системы, которые были осуществлены в космосе. Особый интерес к данному направлению исследований связан с тем, что в отличие от зрения или слуха, вестибулярная система практически всех видов животных начинает реагировать на стимуляцию (линейное или угловое ускорение) еще до рождения. Нормальное предлежание и выход из родовых путей головой вперед, характерные для человека и многих млекопитающих, достигаются с помощью активного внутриутробного поведения с использованием вестибулярного аппарата. Многие младенцы, рожденные из тазового предлежания, имеют постнатальные вестибулярные расстройства.

На стадии постнатального онтогенеза формируется архитектура нервных связей рецепторов сенсорных систем со структурами различных отделов нервной системы включая кору больших полушарий. В процессе формирования специализации и физиологических свойств нейронных связей важнейшую роль играет информация, поступающая от соответствующих рецепторов. Простейшим способом изучения влияния информации от рецепторов является сенсорная депривация, достигаемая исключением соответствующих рецепторов. Единственными рецепторами, которых невозможно подвергнуть депривации на Земле, являются рецепторы саккулюса и утрикулюса, вследствие отсутствия способа лишения системы гравитационной стимуляции. Поэтому для проверки

роли вестибулорецепторов, вестибулярных ганглиозных клеток, образующих синапсы с вестибулярными волосковыми клетками, и нейронов вестибулярных ядер в формировании архитектуры нервных связей следует планировать эксперименты в условиях микрогравитации. Дополнительно вестибулярная система получает информацию от проприоцептивной системы, участвующей в контроле длины и напряжения мышц, и от зрительной системы, участвующей в регуляции движений глазных яблок. К сожалению, в настоящее время мало что известно о точном характере этих взаимодействий и практически нет информации относительно развития этих связей пре- и постнатальном онтогенезе.

2.2. Зрительная система в условиях космического полета

Для детального знакомства с анатомией и физиологией зрительной системы необходимо внимательно прочесть соответствующий раздел учебника физиологии сенсорных систем (например, Мельник и соавт., 2021 [1], с. 25-51; Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 404-412 и др.).

В условиях космического полета существенно изменено освещение зрительных объектов по сравнению с поверхностью Земли. Освещенные солнцем объекты выглядят ярче, чем на Земле. Это связано с тем, что атмосфера Земли поглощает не менее 15% солнечной радиации; водяной пар, смог и облака могут значительно увеличить это поглощение. В целом уровень освещенности объектов, с которыми космонавты работают днем, приблизительно на четверть выше, чем на Земле. С другой стороны, отсутствие атмосферного рассеивания света приводит к тому, что области, не находящиеся под прямым солнечным освещением, кажутся намного темнее, что вызывает трансформацию нормальных

отношений визуальной интенсивности между освещенными и неосвещенными объектами.

Некоторые первые астронавты утверждали, что с орбиты они могли легко увидеть невооруженным взглядом такие объекты, как корабли, самолеты, грузовики, что предполагает значительное улучшение остроты зрения в условиях космического полета. Однако, точные измерения показали, что в космическом полете существенных изменений остроты зрения не происходит. Иногда астронавты действительно способны обнаруживать движущиеся объекты (самолеты и корабли), вероятно, на основе обнаружения турбулентности или волн позади транспортных средств. Кроме этого, идентифицировать мелкие объекты помогает цветовой контраст. Так, астронавт Уильям Пог описал это явление во время своего полета на Скайлэб: «Мы были способны легко видеть айсберги около ста ярдов в диаметре из-за большого контраста белого льда с темно-синим морем». Орбитальные эксперименты с тестированием большого количества показателей зрения (чувствительность к контрасту, положение и доминантность глаз, частота слияния мельканий, бинокулярное зрение, острота зрения) показали, что за исключением снижения чувствительности к контрасту, существенных изменений зрения в условиях космического полета не происходит.

Другим явлением, о котором сообщали некоторые космонавты и астронавты, является снижение способности ясно видеть на близком расстоянии в космосе (признаки дальнорзости). Большинство этих космонавтов и астронавтов были в возрасте слегка за сорок, и они могли ясно видеть без очков для чтения, когда были на Земле. Одно из правдоподобных объяснений этого явления заключается в том, что глаз по своим физическим свойствам похож на водяной шар. Если его положить на горизонтальную поверхность, он станет длиннее после распрямления (что можно наблюдать на Земле). Если же поместить этот водяной шар в космос, он умень-

шится, став более круглым. Глаз должен вести себя аналогичным образом, и укорочение его продольного размера приводит к дальности, что затрудняет видение объектов вблизи.

Влияние невесомости на зрение может также объясняться смещением биологических жидкостей тела в направлении головы после выхода на орбиту и скоплением жидкости в туловище и нижних конечностях после возвращения на Землю. Известно, что микрогравитация вызывает смещение в головном направлении 700-1400 мл жидкости. После окончания полета наблюдается значительное уменьшение размеров сосудов сетчатки. Внутриглазное давление поднимается во время полета и опускается ниже предполетного уровня после приземления. Эти изменения внутриглазного давления, вероятно, связаны со сдвигами биологических жидкостей. Влияние длительных полетов на эти функции пока неизвестно и нуждается в специальных исследованиях.

Некоторые космонавты обращали внимание на ощущение световых вспышек при отсутствии каких-либо световых стимулов. Это явление объясняется прохождением тяжелых ионизированных космических частиц через клетки сетчатки глаза.

Многие астронавты и космонавты сообщали о нарушениях в визуальной оценке расстояний как на Луне, так и при орбитальных полетах. В послеполетном разборе астронавт Пит Конрад, побывавший на Луне, сообщал: «Когда мы были на поверхности Луны, вещи, которые были далеко, выглядели гораздо ближе, чем были на самом деле. Меня смутило то, что мы были так близко к кратеру Сервейор. Я не понимал, что мы были не так близки к нему, как казалось». Его партнер Алан Бин сообщает: «Судя по всему, нам потребовалось много времени, чтобы убедить себя в том, что некоторые кратеры, которые казались такими близкими, на самом деле были намного дальше». Столкновение корабля «Прогресс» со станцией «Мир» в 1996 году могло произойти из-за неверной оценки космонавтами «Мира» фактического расстояния между

двумя кораблями. Существует гипотеза о том, что восприятие абсолютных расстояний меняется после длительного пребывания в замкнутом пространстве, где все предметы находятся на близком расстоянии. В такой ситуации субъективное представление о расстояниях между объектами и наблюдателем изменяются, так как на борту нет объектов с большими размерами (таких как деревья, здания, транспортные средства, и т.п.) на заднем плане. Это происходит внутри космического корабля или в любом другом изолированном месте. Объекты, находящиеся внутри космической станции, находятся на расстоянии от нескольких сантиметров до нескольких метров, тогда как внешние объекты (Земля или звезды) очень далеко. Среднее расстояние до предметов отсутствует. Возможно, по этой причине изменяется восприятие расстояния до предметов, расположенных в промежуточном диапазоне.

Люди других профессий, которые проводят длительное время в закрытых помещениях (например, водолазы или подводники), также имеют проблемы с оценкой расстояния, когда они выходят на поверхность. По этой причине членам экипажа подводной лодки во многих странах не разрешается управлять автомобилем сразу после возвращения из длительного плавания в замкнутом пространстве.

Взаимодействие вестибулярной и зрительной систем выражается, в частности, в том, что зрение может в значительной степени компенсировать возникающие в условиях космического полета изменения чувствительности рецепторов отолитового аппарата. Это помогает в пространственной ориентации и имеет важное значение для координации движений. Космонавты, работающие в условиях микрогравитации, должны больше полагаться на зрение, чтобы сохранять пространственную ориентацию, так как сигналы с отолитов больше не сигнализируют о направлении вниз. Известно, что зрительное восприятие движущихся визуальных сцен может создать убедительную иллюзию движения самого наблюдате-

ля. Такие иллюзии становятся еще более выраженными в невесомости, поскольку визуальная информация не подвергается коррекции со стороны рецепторов отолитового аппарата. Последние в условиях микрогравитации не могут ни подтвердить, ни опровергнуть наклон тела. Это было подтверждено в ходе космических экспериментов, в которых члены экипажа, наблюдавшие за вращающимся полем зрения, имели более выраженное ощущение вращения собственного тела, чем на Земле [4]. Также установлено, что лягушки, рожденные в условиях микрогравитации, демонстрируют более выраженную поведенческую реакцию на движущиеся визуальные сцены при их тестировании после возвращения на Землю, чем контрольные животные, рожденные на Земле.

Члены экипажа, которые летали в относительно небольших отсеках Союза, Меркурия, или Аполлона редко сталкивались с проблемами ориентации. Однако экипажи больших по размерам кораблей (Скайлэб, Шаттл и др.) часто сообщали о проявлениях случайной дезориентации, в особенности при покидании своих кресел и работе в условиях визуально непривычной ориентации. Проблема дезориентации возникала и внутри космического корабля, и снаружи, при выходах в открытый космос, в особенности при положении головой к Земле, когда у астронавтов возникала боязнь быть «захваченными» гравитацией и упасть на Землю. Это заставляло сильнее хвататься за перила и существенно нарушало выполнение работы.

Хотя эпизоды зрительной дезориентации могут наблюдаться у многих членов экипажа, у некоторых из них нарушения ориентации встречаются чаще и проявляются сильнее. К этой группе относятся люди, полагающиеся в первую очередь на зрительную информацию, «визуальные подсказки» для определения своей пространственной ориентации в условиях микрогравитации. Проблемы таких людей прежде всего обусловлены естественной тенденцией предполагать, что поверхность, видимая под ногами, – это пол. При работе «вверх ногами» в космическом корабле, стены,

потолок и пол становятся тождественными вследствие отсутствия гравитации. Однако при виде другого члена экипажа, «плывущего» вверх ногами, внезапно возникает ощущение собственной «перевернутости» из-за подсознательной уверенности, перенесенной из жизни на Земле, что люди должны вертикально стоять на ногах. Отсутствие информации от рецепторов отолитового аппарата также вносит свой вклад и заставляет некоторых членов экипажа чувствовать себя постоянно перевернутыми, независимо от их реальной ориентации в космическом корабле. Другие испытуемые более «ориентированы на тело»; они выстраивают свою экзоцентрическую вертикаль вдоль продольной оси тела и воспринимают ось тела относительно положения окружающих предметов. Такие люди обычно не ощущают проблем в пространственной ориентации в космическом полете даже при отсутствии зрительных ориентиров.

Существует также естественная тенденция воспринимать Землю как расположенную внизу. Глядя из иллюминатора на Землю, находящуюся над головой, некоторым членам экипажа может показаться, что они стоят на голове. При этом, если что-то обронить в невесомости, первой инстинктивной реакцией является попытка поиска предмета под ногами, что, конечно, не является верным решением.

С целью профилактики зрительных иллюзий ориентации применяются предполетные тренировки в бассейне и использование виртуальной реальности с имитацией измененной пространственной ориентации. Такие тренировки дают хороший эффект и помогают сохранять пространственную ориентацию на орбите.

2.3. Слуховая система в условиях космического полета

Для детального знакомства с анатомией и физиологией слуховой системы необходимо внимательно прочесть соответствующую литературу.

ющий раздел учебника физиологии сенсорных систем (например, Мельник и соавт., 2021 [1], с. 51-66; Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 412-416 и др.).

Штамп, пришедший из научно-фантастических фильмов: «В космосе никто тебя не услышит», по-видимому, является одной из причин недостаточного интереса исследователей к изучению особенностей слуха в условиях космического полета. Как следствие – малое количество научных публикаций на это тему. На самом деле, в полете космонавты подвергаются значительным постоянным звуковым воздействиям. Главным источником этого воздействия является оборудование жизнеобеспечения (кондиционеры, вентиляционные клапаны и др.), являющееся источниками шума, интенсивностью до 100 дБА. Кроме этого, космонавты постоянно взаимодействуют и общаются с другими членами экипажа в условиях отсутствия конфиденциальности и личного пространства. Таким образом, периодов тишины, имеющих в условиях пребывания на Земле, на корабле не существует. Использование берушей может уменьшить шумовое воздействие, но не вибрацию.

Порог слышимости принят за 0 дБА, что соответствует 0,00000003% атмосферного давления. Болевой порог – это 0,03% атмосферного давления, или примерно соответствует 120 дБА. Даже то, что мы называем «тишиной» на Земле, на самом деле является фоновым шумом около 40 дБА.

Изучение факторов космического полета поднимает целый спектр вопросов о шуме, касающихся его влияния на восприятие и производительность космонавтов, адаптационных эффектов, утомляющих и раздражающих аспектов шума и индивидуальных различий в чувствительности. Поскольку на борту всегда присутствует определенный минимальный уровень шума, условия космического полета потенциально представляют собой стрессовую шумовую среду.

В настоящее время существуют требования к шуму на борту космического корабля, в соответствии с которыми уровень шума должен быть сравнимым с офисной или домашней обстановкой. Важную индивидуальную роль в восприятии звука могут играть слабое знание языка собеседника и реверберация звуков на борту. Оба эти фактора ухудшают слух. Кроме этого, низкий уровень шума также может раздражать и отрицательно влиять на отдельных людей и групповое коммуникативное поведение.

Исследование слуха у космонавтов является трудновыполнимым в условиях космического полета, потому что классические методы оценки слуха невозможно использовать в шумной среде, часто встречающейся на космических кораблях без достаточной звукоизоляции. В то же время, поскольку экипаж часто подвергается риску потери слуха из-за уровня шума, встречающегося во время космического полета, исследование слуха космонавтов крайне желательно проводить вовремя и после полета.

Накопленные к настоящему времени экспериментальные данные предполагают отсутствие существенных влияний факторов космического полета на слуховые функции. Так, в ходе исследований американских астронавтов было установлено, что существенных изменений латентного периода ответов ствола мозга на звуковое воздействие во время полета не наблюдается. Сделан вывод о том, что слуховая функция в условиях микрогравитации не изменяется [5]. В других экспериментах, выполненных на орбитальной станции «Мир», показано, что точность локализации источника звука в условиях микрогравитации находится в тех же пределах, что и на Земле: 1-2°. Так как способность локализации звука источников зависит от нормального бинаурального слуха, из этого исследования был сделан вывод, что бинауральный слух у космонавтов не изменен.

2.4. Обонятельная и вкусовая системы в условиях космического полета

Для детального знакомства с анатомией и физиологией обонятельной и вкусовой системы необходимо внимательно прочесть соответствующий раздел учебника физиологии сенсорных систем (например, Мельник и соавт., 2021 [1], с. 87-102; Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 419-422 и др.).

В условиях космического полета происходят изменения обоняния и вкуса. Это, в частности, проявляется в том, что космонавты употребляют больше приправ и специй для придания вкуса готовой пище. Уменьшение чувствительности к вкусу и запаху может быть результатом пассивной заложенности носа вследствие смещения биологических жидкостей к голове. Пороговые концентрации нелетучих компонентов пищи, воспринимаемых вкусовыми рецепторами, в условиях микрогравитации могут повышаться из-за снижения механической стимуляции в результате изменения процесса конвекции.

В специальных экспериментах в целом не было обнаружено существенных изменений обоняния (применяли фильтровальную бумагу, смоченную лимоном, мятой, ванилью или дистиллированной водой в качестве контроля) и вкуса (использовали растворы сахарозы, мочевины, хлорида натрия и лимонной кислоты) после космического полета, хотя наблюдались значительные индивидуальные различия. Последние могли быть обусловлены воспоминаниями о симптомах космической болезни укачивания.

Материалы, используемые в космическом полете, подвергаются испытаниям на пахучесть так же, как и на воспламеняемость и токсичность. Оценку запаха проводят с помощью испытательных комиссий, члены которых оценивают пахучесть материалов в баллах от 0 (нет запаха) до 4 (раздражающий запах). Обычно при-

емлемыми считаются материалы, соответствующие оценке не более 2,5. Тем не менее, поскольку твердые частицы не оседают в невесомости, проблемы с запахом в космической среде могут быть более серьезными чем в земных условиях.

Иногда реакция на запахи может быть усилена наличием зрительной информации. Например, во время ранних американских миссий Spacelab астронавты жаловались на неприятные запахи. Эти запахи они приписывали приматам, и крысам, которых они тестировали в экспериментах и которые постоянно находились на виду. В последующих миссиях клетки с животными были размещены в визуально разделенных областях того же отсека, после чего проблем с запахом не возникало.

2.5. Проприоцептивная система в условиях космического полета

Для детального знакомства с анатомией и физиологией вестибулярной системы необходимо внимательно прочесть соответствующий раздел учебника физиологии сенсорных систем (например, Мельник и соавт., 2021 [1], с. 76-87; Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 129-137 и 423-425 и др.).

В условиях микрогравитации изменяется восприятие стимулов, поступающих от проприорецепторов и влияющих на пространственную ориентацию, что может приводить к нарушению оценки положения конечностей, трудностям осуществления точных произвольных движений, нарушениям восприятия массы предметов и искажению тактильной чувствительности. Однако, механизмы проприоцептивных изменений до сих пор изучены слабо. В частности, почти отсутствует информация, полученная с использованием датчиков измерения статических и динамических углов суставов конечностей и шеи, не исследована роль локальных

тактильных сигналов в восприятии и регуляции вертикального положения тела.

Когда космонавтов просят запомнить положение в пространстве тех или иных предметов, а затем закрыть глаза и показать это положение рукой, очень часто они совершают значительную ошибку и показывают на точку, расположенную ниже, чем находится предмет. При попытке прикоснуться к различным частям тела, обычно отмечается, что рука касается не совсем того места, что ожидается. Эти примеры указывают на то, что в условиях космического полета либо нарушается проприоцептивная функция, либо развиваются нарушения на уровне сознания репрезентативной пространственной карты окружающего мира, либо оба эти нарушения происходят одновременно.

Классическая методика изучения проприоцептивной функции заключается в вибрационном воздействии на сухожилия мышц с целью вызвать иллюзию движения конечности. С помощью этой методики было установлено, что при вибрационном воздействии на мышцы голени иллюзия наклона тела вперед или назад менее выражена в полете, чем после возвращения на Землю. По всей видимости в условиях микрогравитации рецепторы саккулюса и утрикулуса существенно разгружаются и оказываются заторможенными, что приводит к снижению их нисходящей модуляции альфа- и гамма-мотонейронов, и, как следствие, к снижению тонических вибрационных рефлексов. Другой иллюстрацией изменения проприоцептивных сигналов в ранний период воздействия микрогравитации заключается в том, что космонавты вплоть до третьих суток полета с закрытыми глазами не в состоянии сохранять вертикальную позу, перпендикулярную опоре стопы. Наклон тела вперед, постоянно наблюдаемый в этих условиях, указывает на неточность проприоцептивных сигналов от голеностопного сустава или их анализа в нервной системе. Однако после 3-го дня полета космонавты уже могут сохранять вертикальное положение

в этой ситуации, что указывает на высокую скорость адаптивных процессов в проприоцептивной системе.

Еще одна особенность функционирования проприоцептивной системы в условиях невесомости заключается в том, что в этих условиях труднее определить различия в массе объектов, чем на Земле. Это явление сохраняется до 2-3 суток после полета. Обычно космонавты ощущают свое тело и предметы как излишне тяжелые. Это явление, возможно, связано с потерей собственного веса космонавтами и с неполной адаптацией к микрогравитации. Кажущееся увеличение тяжести объектов указывает на изменение масштаба представительства статического давления в центральной нервной системе в условиях полета.

Глава 3. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА НА ПОЗУ И ДВИЖЕНИЯ

Регуляция позы является сложным интегративным процессом, осуществляемым структурами центральной нервной системы. Важнейшую роль в регуляции позы играет информация, поступающая от вестибулярных, зрительных, соматосенсорных рецепторов о движении. Эта информация определяет адекватную позу и ориентацию тела и, кроме того, координирует деятельность скелетных мышц. Регуляция позы осуществляется в значительной степени автономно, независимо от сознания и произвольного контроля.

3.1. Поза в условиях космического полета в покое

На основании большого количества наблюдений, выполненных американскими исследователями во время миссий Skylab была создана модель позы астронавта в состоянии покоя (рис. 3.1). Для этой позы характерны: наклон головы вперед (линия взгляда на 25 градусов ниже горизонтальной точки отсчета по центру туловища), плечи приподняты вверх (как во время пожимания плечами), руки «на плаву», вверх и вперед на уровне груди.

Однако, последующие исследования, выполненные с учетом антропометрических данных, пола, продолжительности полета показали, что данная модель является слишком общей и содержит неточности. Она требует дополнительных данных, чтобы обеспечить более репрезентативные позы космического экипажа. Также неясно, каким образом направление линии взгляда можно было

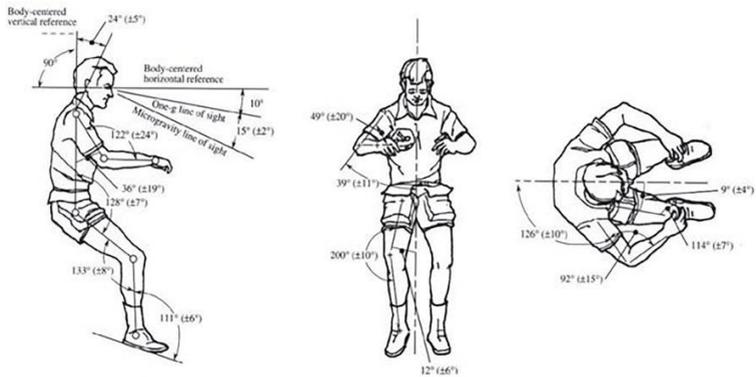


Рис. 3.1. Поза астронавта в состоянии покоя (по материалам NASA)*

оценить по фотографиям, тем более что отклонение взгляда вниз в этой модели в условиях микрогравитации противоречит результатам космических экспериментов, в которых измеряли направление взгляда во время космического полета.

3.2. Вестибулоспинальные рефлексы в условиях космического полета

Результаты экспериментальных наблюдений, выполненных во время орбитальных полетов, показали, что в этих условиях происходят изменения позы и рефлексов основных опорных мышц. В частности, удалось выявить изменение рефлекса Хоффмана (Н-рефлекса), нервные пути которого начинаются от рецепторов отолитов и проходят через спинной мозг. В отличие от хорошо известного коленного рефлекса, вызываемого механическим раздражением (ударом молоточком) рецепторов сухожилия четырехглавой мышцы бедра, Н-рефлекс вызывается электростимуля-

* <http://msis.jsc.nasa.gov/images/Section03/Image108.gif>

цией коротким импульсом тока малой амплитуды чувствительных волокон, идущих от рецепторов растяжения икроножной мышцы, что вызывает рефлекторное появление в мышце электрической активности [6]. Последнюю регистрируют с помощью электромиографии (ЭМГ). На ЭМГ подсчитывают количество импульсов, отражающее число мотонейронов икроножной мышцы, вовлеченных в реакцию. Когда данную реакцию исследовали в условиях космического полета, оказалось, что выраженность ответа на ЭМГ икроножной мышцы существенно снижается, причем это снижение происходит быстро в первые сутки полета, а затем становится постепенным, но продолжается в течение многих суток. Восстановление исходной выраженности Н-рефлекса после возвращения на Землю занимает несколько дней.

Другим популярным методом динамического исследования позы является тестирование с движущейся платформой (рис. 3.2). Тестирование многократно выполняли до и после космического полета с использованием компьютеризированной системы динамической постурографии, широко используемой для оценки нарушений равновесия. Система состоит из платформы и визуальной объемной картины; обе они моторизованы для имитации движения. Космонавты проходят несколько тестов до и после полета для того, чтобы установить стабильный индивидуальный уровень равновесия и время, необходимое для его восстановления. Проводятся два теста. В ходе первого теста исследуются реакции на внезапные, угрожающие равновесию движения платформы. Для этого платформенные двигатели с компьютерным управлением производят последовательные наклоны (носки вверх и вниз) и перемещения (назад и вперед) в чтобы нарушить равновесие субъекта. В ходе второго теста проверяется способность испытуемого оставаться в вертикальном положении, когда изменяется зрительная информация или информация от проприорецепторов мышц и суставов лодыжки.

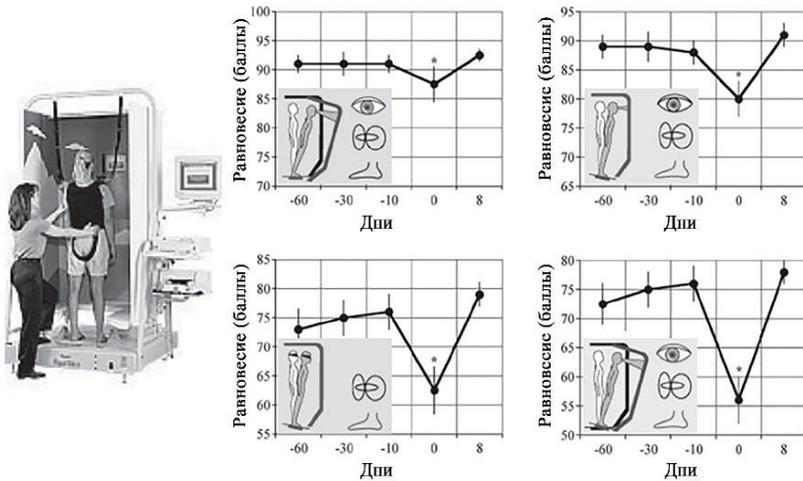


Рис. 3.2. Установка для тестирования способности сохранять неподвижную устойчивую позу стоя на платформе внутри будки (по [7])

Платформа и будка предназначены для изоляции от сенсорной информации, влияющей на равновесие (зрительной, вестибулярной и проприоцептивной). Например, будка следует за телом при его наклонах и раскачивании для компенсации визуальной информации (вверху слева и внизу справа). Информация от проприоцептивных рецепторов в лодыжках компенсируется путем перемещения платформы для ног (вверху справа и внизу слева). После космического полета (день 0) поза космонавтов менее стабильна.

Исследования с использованием движущейся платформы показали статистически значимое снижение стабильности позы после космического полета. Стратегия организма, направленная на сохранение равновесия на движущейся платформе, модифицируется, а поведение испытуемых указывает на нарушение осознания направления и амплитуды движения. В день посадки у каждого испытуемого наблюдалось значительное снижение поструральной стабильности, а в отдельных случаях встречались клинически

аномальные баллы, значительно ниже нормативных (в пределах 5-го процентиля у случайно отобранных представителей популяции, в контроле). После полета, длившегося от 5 до 13 дней, ре-адаптация занимала до 8 суток и характеризовалась быстрой начальной фазой продолжительностью около 2,7 часов и вторичной более медленной фазой продолжительностью около 100 часов. Оценка влияния на регуляцию позы космонавтов таких факторов как возраст, пол и длительность полета до настоящего времени не закончена.

3.3. Движения в условиях космического полета

Видеокадры осторожной и кажущейся неуклюжей походки космонавтов и астронавтов, вновь прибывших на космическую станцию, и сразу после возвращения на Землю – очевидные свидетельства изменений сенсомоторной координации, возникающих в условиях космического полета. Как правило, навыки передвижения в условиях микрогравитации усваиваются достаточно быстро и не представляют проблемы, однако, полная адаптация движений продолжается около месяца. Визуально заметно, что космонавты, которые длительное время находятся на космической станции, двигаются более координированно, без лишних движений. Они могут свободно парить перед дисплеем, тогда как вновь прибывшие члены экипажа часто ищут опору, чтобы удержать стабильную позу.

Важная особенность локомоторной активности в условиях микрогравитации заключается в том, что космонавты перестают использовать ноги и вместо этого пользуются пальцами рук, чтобы подтягивать или толкать тело. Такое движение становится максимально точным, если его направление проходит через центр тяжести тела, расположенный чуть выше уровня бедер. Новички в полете часто инстинктивно держат руки над головой, чтобы

отталкиваться от предметов или хвататься за них. Однако, при этом возникает большое количество нежелательных вращений, которые заставляют выполнять множество дополнительных рывков и толчков, делающих неуклюжими движения. Вместо этого в невесомости рекомендуется держать руки на бедрах и смело двигаться головой вперед. В этой ситуации толчки и подтягивания будут направлены через центр тяжести тела, что делает контролируемые движения координированными, без нежелательных вращений.

Теоретически движения в невесомости подчиняются классическим законам Ньютона. Сила трения в этих условиях пренебрежимо мала, а угловой момент всегда сохраняется, если на тело не действует внешний крутящий момент. Богатая информация об особенностях движений в космическом полете была получена из видеозаписей гимнастических упражнений, выполняемых космонавтами. Видеозаписи, на которых космонавты кувыркались, крутились и вращались в невесомости, подтвердили, в частности, принцип сохранения углового момента. На всем протяжении их движения и вплоть до контакта со стенками отсека угловой момент был постоянным и составлял $35,7 \pm 1,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{сек}$ при свободном вращении.

Резкое уменьшение использования ног в полете приводит к переключению на принципиально иную сенсомоторную стратегию. Некоторые из этих новых сенсомоторных программ переносятся на послеполетный период, что приводит к неустойчивости позы и походки после возвращения на Землю. И российские космонавты, и американские астронавты сообщали о появлении нестабильности позы и походки даже после кратковременного (5-10 суток) космического полета. При этом часто возникает ощущение поворота при попытке идти по прямой траектории, наблюдаются внезапная потеря постуральной устойчивости особенно при поворотах, ощущается преувеличенная длина шагов и произвольные движения головы при ходьбе, внезапная потеря ориен-

тации. Кроме того, иногда возникает дезориентация и иллюзия собственного некоординированного движения при изменениях положения головы, индуцированных локомоцией. При ходьбе в начале опорной фазы локомоции, когда начальная фаза контакта стопы с поверхностью характеризуется быстрым торможением стопы, величина этого замедления зависит от скорости ходьбы и жесткости опорной поверхности. Силы, создаваемые ударом пятки, проходят через тело и достигают головы. Этот «комплекс» голова-шея-глаз функционирует во взаимодействии, чтобы минимизировать угловые отклонения взгляда во время движения. После космического полета были зарегистрированы нарушения координации движений головы, туловища и нижних конечностей. Возникали изменения тонуса мышц головы и шеи, снижалась согласованность между движениями туловища и компенсаторными движениями головы, появлялись признаки осциллопии (иллюзии визуального объемного движения) во время ходьбы на беговой дорожке после полета (рис. 3.3.). В контактной фазе ходьбы стопа «упиралась» в опорную поверхность с большей силой, чем перед полетом.

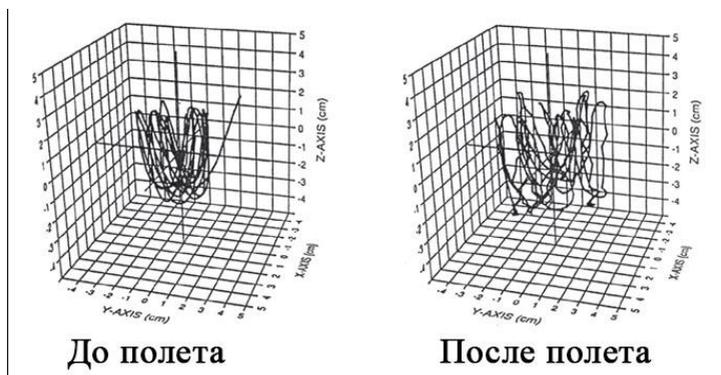


Рис. 3.3. Траектория движений головы в трех осях (X, Y, Z) астронавта при ходьбе на тредмиле до полета и в первые сутки после полета (по [8])

Выявленные нарушения двигательной сферы, наблюдающиеся после космического полета, вызывают беспокойство по поводу способности экипажа самостоятельно покинуть космический корабль в случае чрезвычайной ситуации. Как обсуждалось ранее, многие члены экипажа испытывают заметное головокружение при движениях головой во время приземления и после него. Это головокружение может быть серьезным препятствием к успешному выходу из кабины вследствие ухудшения зрения, например, в условиях задымления.

На Земле на моторное поведение человека существенно влияет гравитация. Около 60% активности нашей мускулатуры занято противодействием силе тяжести. Например, при движениях конечностей в состоянии статического равновесия предстоящие изменения расположения и проекции центра массы тела, обусловленные планируемыми движениями, заранее компенсируются совокупностью команд, формирующихся на уровне центральной нервной системы и реализуемых во время движения. Подобная программа упреждающей компенсации формируется и в полете, хотя функционально она оказывается ненужной. Кроме того, быстрое сгибание туловища вперед и назад в талии сопровождается на Земле смещением назад и вперед бедра и колени для сохранения равновесия. Те же компенсаторные движения бедра и колени производятся и в невесомости, однако поскольку эффективные моменты силы тяжести во время космического полета отсутствуют, совокупность нейронных команд, необходимая для достижения синергии этих движений в невесомости, должна отличаться от тех, которые необходимы на Земле. Следовательно, эти движения в полете должны отражать реорганизованные программы мышечной активности.

Эксперименты, выполненные в 1982 г. на космической станции «Салют-7», показали, что некоторые мышцы-разгибатели ног (например, передняя большеберцовая мышца) играют более значи-

тельную роль в космосе, чем на Земле. В условиях микрогравитации они участвуют в ориентации тела относительно опоры в отличие от общей функции разгибателей на Земле – противодействия гравитации. Такая передача двигательных стратегических программ от одной мышечной группы другой объясняет наклоненную вперед позу членов экипажа, при указании сохранять позу перпендикулярно стопе с закрытыми глазами (см. рис. 3.1).

Анализ письма или рисунка космонавтов показал, что тонкие движения в условиях микрогравитации не изменяются. Когда космонавтов просили нарисовать в воздухе горизонтальные эллипсы без помощи зрения, результаты указывали на незначительные изменения. Это свидетельствует о том, что телесная (эгоцентрическая) система отсчета двигательной сферы не нарушена. Космонавты были способны сохранять ощущение вертикальной оси, несмотря на исчезновение главного фактора вертикальной ориентации на Земле, силы гравитации. Однако типичная поза с наклоном головы указывает на то, что ось головы также может использоваться в качестве системы отсчета для движений рук.

3.4. Движения глазных яблок в условиях космического полета

Непроизвольные движения глазных яблок являются одной из важнейших реакций вестибулярной системы. Ценность изучения движений глаз связана с тем, что они ограничены вращением в трех плоскостях, что способствует точному измерению (например, с помощью видеозаписи глаз в ближнем инфракрасном свете) и получению точных количественных данных. Для того, чтобы сохранять устойчивым, ясным и неподвижным изображение окружающего мира на сетчатке, движения глазных яблок должны постоянно компенсировать движения головы. При движениях головы

вестибулярный аппарат измеряет скорость и направление этих движений и передает эту информацию в центры, контролирующие положение глаз для создания их компенсаторных движений. Этот вестибулоокулярный рефлекс гарантирует, что зрение не будет размытым (рис. 3.4.). В темноте вестибулоокулярный рефлекс приводит к появлению ритмичных движений глаз, известному как нистагм, состоящий из медленных фаз в направлении, противоположном движениям головы, и быстрых фаз, возвращающих глаз в исходное положение. Реакция нистагма на быстрое движение головы продолжается после того, как прекращается возбуждение рецепторов полукружных каналов. Это происходит за счет продолжающегося возбуждения нейронов вестибулярных ядер и ядер глазодвигательных мышц, расположенных в стволе мозга.

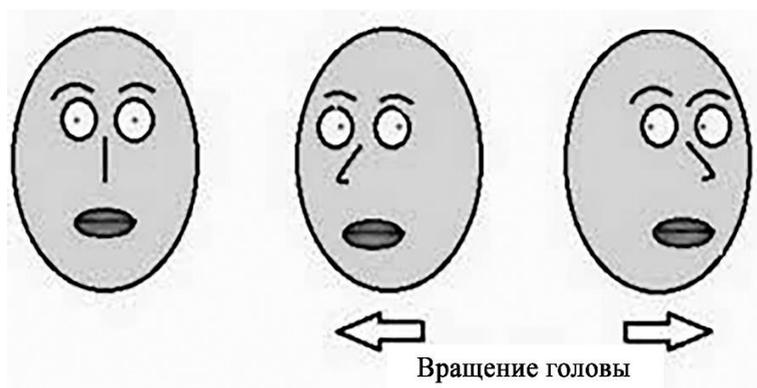


Рис. 3.4. Компенсаторные движения глаз

Компенсаторные движения глаз носят название вестибулоокулярного рефлекса, возникают при фиксации взгляда на предметах и поворотах головы*.

* <http://webservices3.lf1.cuni.cz>

Вестибулоокулярный рефлекс подробно изучался в условиях орбитального полета как при активных (произвольных), так и при пассивных движениях головы. Было обнаружено уменьшение амплитуды вертикальных движений глаз при вестибулоокулярном рефлексе в течение первых трех суток невесомости по сравнению с Земными условиями. В этих экспериментах регистрировались движения глаз космонавта, когда он произвольно двигал головой, фиксируя зрительную цель или представляя эту цель в темноте. После четырех дней пребывания на орбите вестибулоокулярный рефлекс вернулся к предполетному уровню, возможно, в результате замены сигналов с шейных проприорецепторов сигналами с вестибулярных рецепторов.

В нескольких исследованиях было установлено, что после кратковременного космического полета при попытке фиксации взгляда на цели, смещенной в сторону, движения головы и глаз значительно изменяются. После продолжительных космических полетов наблюдались проблемы зрительно-моторной координации и размытость визуальной сцены после возвращения на Землю. Отслеживание движущихся визуальных целей также изменялось, особенно в вертикальном направлении. Космонавты испытывали трудности при отслеживании вертикального перемещения цели. Когда цель перемещалась вверх, она отслеживалась взглядом с помощью быстрых саккадических движений, а не плавного движения глазных яблок как до полета. Такие нарушения могут потенциально затруднять решение задач пилотирования при посадке. Причиной этих явлений, по-видимому, являются изменения функции вестибулярных рецепторов из-за отсутствия силы тяжести и вторичные нарушения функции вестибулярных ядер, расположенных в стволе мозга.

Способность сохранять фиксацию взгляда на цели при движениях головы уменьшается сразу после приземления. По сравнению с предполетной реакцией, движение головы замедлено и его ам-

плитуда уменьшается после полета (1). Как следствие, вестибуло-окулярный рефлекс возникает в неподходящее время (2), отводя взгляд от цели (3). Возникают глазные саккады (4), помогающие направить взгляд обратно на цель (5) (рис. 3.5)*.

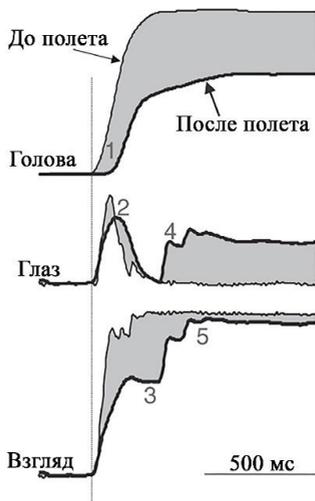


Рис. 3.5. Способность сохранять фиксацию взгляда на цели при движениях головы после приземления

Установлено, что на Земле во время поворотов движения глазных яблок отражают ориентацию на результирующие линейные ускорения. Это правило соблюдается при пассивном вращении (как в центрифуге), при ходьбе или беге по криволинейной траектории. В этих условиях ось вращения глазных яблок стремится совместиться с результирующей осью суммированных линейных ускорений. Похожее явление возникает при просмотре визуальной сцены, которая движется по горизонтали, с наклоненной

* Clement G. Fundamentals of space medicine. Springer, Dordrecht, Netherlands. 361 p.p. 2005 с изменениями [11].

в сторону головой. Движения глаз (также называемый оптокинетический нистагм) становятся косыми по отношению к зрительной сцене, как если бы они пытались выровняться вдоль равнодействующей визуального движения и гравитации. Эксперименты в космосе показали, что эта гравитационно-ориентированная реакция отсутствует в условиях микрогравитации, и что наблюдается возврат к нормальной предполетной реакции через два дня после возвращения на Землю.

На Земле движения глазных яблок при концентрации взгляда на предметах, движущихся вертикально вверх или вниз, оказались асимметричными: как правило, легче следовать взглядом за восходящим, чем за нисходящим предметом. Для интерпретации этого явления привлекают эволюционную адаптацию движений глазных яблок при ходьбе. В этих условиях возникает постоянная необходимость нисходящего движения глаз для контроля за поверхностью. Однако, это движение глаз вниз подавляется, чтобы контролировать расстояние до препятствий. Эксперименты показали, что вертикальная асимметрия имеет тенденцию к исчезновению в условиях космического полета вследствие отсутствия гравитации и отсутствия соответствующих сигналов с отолитового аппарата [9].

Глава 4. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА НА КОГНИТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПАМЯТЬ, ОБРАБОТКУ ИНФОРМАЦИИ

Когнитивные процессы являются функцией головного мозга. Когнитивные функции предполагают обработку информации, однако, при этом происходит не только генерация ответных реакций на поступающие сигналы, но и понимание того, что происходит. В данной главе мы сфокусируемся на известных фактах об изменениях когнитивных функций во время и после космического полета и представляющих интерес для космической физиологии и медицины.

4.1. Навигация в условиях космического полета

Одной из важных функций мозга позвоночных является формирование и поддержание «нейронных карт» пространственного окружения, обеспечивающих четкое топографическое представление о местоположении организма и его частей относительно окружающих предметов. Это картирование формируется с помощью сенсорной информации и используется двигательными системами. Например, визуальное пространство проецируется и картируется на сетчатке глаза в двумерной системе координат. Затем информация с этих карт от сетчаток обоих глаз переносится и последовательно обрабатывается в иерархически организованных отделах зрительной системы мозга, включающих зрительную кору. Похожим образом организована карта локализации звуков в пространстве, соматосенсорная карта и др. Система нейронных карт должна

также содержать информацию о положении головы в гравитационном поле. В экспериментах на орбите было доказано существование мультисенсорной космической карты в гиппокампе млекопитающих, обеспечивающей кратковременную память о местоположении животного в пространстве. Эта нейронная карта использует как проприоцептивные, так и зрительные сигналы. Она используется не только для осознанного представления о расположении организма, но и для планирования перемещений. Совокупность этих процессов носит название навигации.

При анализе нейронных навигационных карт в настоящее время используется представление о существовании «клеток места» в гиппокампе, ответственных за хранение информации о текущем местоположении. В экспериментах на крысах, проведенных американскими астронавтами на борту космической станции «NeuroLab», животные бежали по дорожке, направлявшей крыс к исходному положению после трех поворотов направо на 90° градусов. Перед экспериментом крысам имплантировали в гиппокамп многоэлектродные записывающие матрицы (multielectrode arrays, MEA), позволявшие в течение длительного времени регистрировать активность предполагаемых клеток места. Полученные результаты показали, что крысы после всего трех поворотов на 90° не осознавали, что они вернулись к первоначальному месту.

Подобные эксперименты помогают объяснить иллюзии визуальной инверсии и навигационные трудности, с которыми сталкиваются некоторые космонавты, когда они пребывают в космосе. Среда на космическом корабле представляет собой необычную трехмерную обстановку, где законы движения Ньютона превалируют над земной интуицией. Находясь на Земле, мы обычно планируем перемещения с места на место в двух измерениях. Однако на орбите можно решить, что лучший способ перемещения – пересечь потолок, а затем сесть на стене. Кроме того, каждый модуль

МКС обеспечивает местная визуальная система отсчета для тех, кто работает внутри. Отдельные модули МКС часто соединяются под прямыми углами, поэтому не все локальные системы отсчета совмещаются между собой. Это приводит к тому, что иногда можно потерять пространственную ориентацию, особенно при смене модуля. Даже после нескольких месяцев жизни на борту МКС иногда трудно визуализировать трехмерные пространственные отношения между модулями и перемещаться по модулям инстинктивно, не используя запомненных ранее ориентиров. Членам экипажа необходимо не только изучить маршруты, но и иметь трехмерное «обзорное» знание станции. Эти навыки имеют важное практическое значение, поскольку дезориентация и проблемы с навигацией могут стать критическими в случае экстренной эвакуации экипажа при внезапной разгерметизации или пожаре.

4.2. Мысленное вращение предметов в условиях космического полета

Мысленное вращение (mental rotation) – это способность вращать мысленные образы двухмерных или трехмерных предметов, полученные человеческим мозгом на основе зрительной информации об этих предметах. Благодаря мысленному вращению мы способны представить, как предмет будет выглядеть после вращения из своего первоначального положения.

На Земле гравитация обеспечивает удобную точку отсчета благодаря сигналам с рецепторов отолитового аппарата, сигнализирующим о направлении вниз. Существенные вращения тела на Земле обычно происходят лишь в горизонтальной плоскости. В космосе, где отсутствует гравитация, вертикальные перевороты или движение вниз головой становятся обычным явлением. При этом космонавты должны определять положение окружающих

предметов с помощью процесса мысленного вращения предметов в трех измерениях.

Простой тест на мысленное вращение представлен на рис. 4.1. Тестирование в условиях космического полета показало лучшие результаты, чем на Земле. Эта разница была особенно существенной при мысленном вращении предметов вокруг оси кувырка. Такие результаты связывают с различиями в реакциях рецепторов полукружных каналов при фактическом вращении вокруг этих осей в невесомости и на Земле. Однако, влияние космического полета на мысленное вращение пока не выглядит столь однозначным. Недостаточная способность к мысленному вращению порой проявляется в виде неожиданных эпизодов космического полета. Так, описан случай «потери» члена экипажа Шаттла. Несколько его товарищей в течение довольно длительного времени искали этого астронавта, но не смогли его найти, в то время как он был прямо перед ними. Потерянный член экипажа просто висел вверх ногами относительно тех, кто его ищет. Тем не менее, имеющиеся результаты тестирования предполагают, что после нескольких дней пребывания в космосе становится легче идентифицировать перевернутое лицо, чем на Земле.

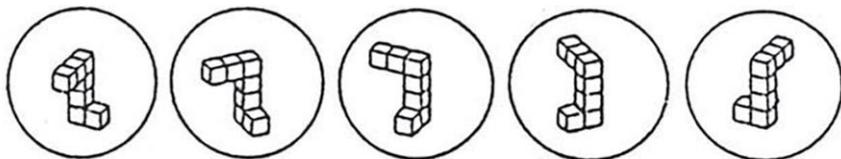


Рис. 4.1. Тест мысленного вращения.

Когда крайняя левая фигура демонстрируется одновременно с крайней правой (угол поворота 180°), время, требуемое для того, чтобы понять, что это одна и та же фигура, в среднем составляет около 5 с. Когда левая фигура демонстрируется одновременно с

центральной (угол поворота 90°), это время составляет около 2,5 с. Таким образом, среднее время в тесте мысленного вращения составляет около $33^\circ/\text{с}^*$ (см. рис. 4.1).

Другие эксперименты были посвящены поиску оси симметрии в отсутствие гравитации. Хорошо известно, что на Земле вертикальную ось симметрии определить легче, чем горизонтальную или наклонную оси симметрии. На обнаружение симметрии на Земле оказывает влияние изменение положения головы относительно туловища. В отличие от этого, в эксперименте, проведенном в космосе на 5 астронавтах, было показано, что как вертикальная, так и горизонтальная ось симметрии определяются одинаково быстро.

4.3. Ментальная репрезентация в условиях космического полета

Точное визуальное представление об окружающей обстановке имеет решающее значение для успешного взаимодействия с окружающими объектами. В нормальных физиологических условиях люди имеют мысленное представление об окружающем пространстве и это представление необходимо для когнитивных функций, в частности, для идентификации объектов и ориентиров, направляющих действия и навигацию, а также для регуляции пространственного восприятия и внимания.

В физике система, которую можно использовать для определения положения, направления и движения называется системой координат. Имеются основания для утверждения о том, что гравитационное поле Земли является одним из самых фундаментальных

* Clement G. Fundamentals of space medicine. Springer, Dordrecht, Netherlands. 2005. 361 p. [11].

ограничений для выбора системы координат для развития и использования когнитивных представлений о пространстве. Например, субъект, смотрящий на ромбовидную фигуру (в координатах сетчатки), может воспринимать ромб как фигуру квадратной формы, когда он и фигура наклонены относительно силы тяжести. Этот пример свидетельствует о том, что восприятие формы объекта, как правило, больше зависит от ориентации этого объекта в мировых (пространственных) координатах, чем от ориентации его проекции в координатах сетчатки глаза. Иными словами, гравитация имеет решающее значение для определения системы координат объекта. Наклон наблюдателя относительно направления гравитации создает конфликт между гравитационной (внешней) вертикалью и вертикалью, определяемой сетчаткой и телом (внутренней). Потеря гравитационного ориентира в космическом полете обеспечивает уникальную возможность дифференцировать влияние внутренних и внешних факторов на систему пространственной ориентации у космонавтов.

Изучение изменений мысленной репрезентации объекта на протяжении всей космической миссии является простым способом определить, как гравитационная система координат используется для пространственной ориентации. Результаты космических исследований предполагают, что отсутствие гравитационной системы координат, определяющей на Земле вертикальное направление, влияет на мысленную репрезентацию вертикального размера предметов и объемов. В одном эксперименте на орбите французского астронавта просили написать с закрытыми глазами свое имя по вертикали, а затем по горизонтали в записной книжке, прикрепленной липкой лентой к его колену. Данные этого теста сравнивали с результатами аналогичного тестирования в предполетный период. Оказалось, что в полете длина написанных слов уменьшается как по вертикали, так и по горизонтали, но верти-

кальная надпись укорачивается сильнее. У другого космонавта уменьшение вертикальной длины слов наблюдалось в течение нескольких дней после возвращения из 28-дневного космического полета. Интересно заметить, что в обоих экспериментах размер букв не менялся ни в полете, ни после полета, но расстояние между ними уменьшалось. Эти результаты предполагают, что в отсутствие гравитационной системы координат ментальная репрезентация вертикального расположения букв претерпевает адаптивные изменения.

В другом тесте два члена экипажа должны были нарисовать известную фигуру – куб Неккера. Эта фигура является простейшим представлением трехмерного объекта в двухмерной системе координат. Сравнение между длиной линии между кубиками, нарисованными на земле, и кубиками, нарисованными во время космического полета, показало уменьшение вертикального размера (высоты) куба на 9% (рис. 4.2). Похожие результаты были получены в другом исследовании с участием двух астронавтов. Вертикальный размер нарисованных от руки с закрытыми глазами эллипсов в невесомости уменьшился на 10-13%, тогда как горизонтальный размер эллипсов практически не изменился.

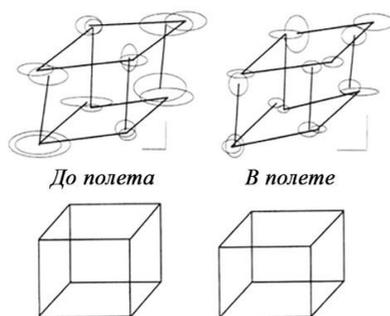


Рис. 4.2. Сравнение между кубиками, нарисованными на земле, и кубиками, нарисованными во время космического полета (по [10])

Сверху рис. 4.2. показаны средние точки куба Неккера, нарисованные до полета и в полете. Внизу рисунка показаны средние размеры нарисованных кубов до полета и в полете. Длина горизонтальных и косых линий не изменилась, но вертикальные линии в условиях микрогравитации стали короче.

Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что ментальная репрезентация вертикального размера предметов и объемов изменяется в условиях невесомости. Описанные исследования могут иметь важное значение для практики космических полетов. Например, если космонавт теряет способность мысленной репрезентации размеров станции, навигация по станции может происходить с ошибками и задержкой. Если квадратные объемы не кажутся космонавтам квадратными, очевидно, необходимо продумать особенности дизайна космической среды обитания. Предполетные тренировки с использованием технологии виртуальной реальности является действенным способом обучения космонавтов компенсации измененной мысленной репрезентации пространства.

Глава 5. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА НА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТУЮ СИСТЕМУ

Перед изучением материалов данной главы рекомендуется внимательно ознакомиться с физиологией сердечно-сосудистой системы в соответствующем разделе учебника физиологии (например, Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 260-310).

Одной из основных проблем как краткосрочных, так и долгосрочных космических полетов является возникновение нарушений функций сердечно-сосудистой системы вследствие снижения физической активности. Эти нарушения тесно связаны с изменениями гемодинамики, распределения биологических жидкостей и водно-электролитного обмена. В настоящей главе рассматриваются данные космических экспериментов и наземных моделей, помогающих понять сущность и физиологические механизмы возникающих сердечно-сосудистых изменений.

Типичный вид нагрузки на сердечно-сосудистую систему, который возникает в условиях космического полета, можно смоделировать в земных условиях. Это быстрые переходы между вертикальным, сидячим и лежачим положением тела. Такие переходы требуют быстрых адаптационных реакций сердца и кровеносных сосудов. На Земле это достигается функциональными реакциями, включающими изменения на уровне сердца и сосудов, а также структур центральной нервной системы, входящих в состав нейронной сети, ответственной за регуляцию деятельности сердца и тонуса сосудов. В условиях микрогравитации происходит исчезновение гидростатических градиентов, имеющих на Земле в по-

ложении стоя. В невесомости кровь смещается из нижней части тела в верхнюю, что, в частности, приводит к удваиванию количества крови, притекающей к сердцу. Сердце отвечает на эту объемную нагрузку увеличением количества перекачиваемой крови, инициируя ее перераспределение, одновременно срабатывают физиологические механизмы, направленные на уменьшение объема циркулирующей плазмы крови.

Выполненные к настоящему времени научные исследования были направлены на понимание последствий влияния космического полета на сердечно-сосудистую систему путем измерения сердечного выброса, частоты сердечных сокращений, тонуса кровеносных сосудов, артериального давления и объема циркулирующей крови. Эти показатели кровообращения изучались как во время космического полета, так и по возвращении на Землю. Одна из целей этих исследований состоит в том, чтобы определить, когда именно происходят реакции гемодинамики, считающиеся предшественниками множества других физиологических изменений, происходящих в условиях микрогравитации.

5.1. Функции сердечно-сосудистой системы при взлете космического корабля

На космическом корабле примерно за 2,5 часа до взлета экипаж принимает лежачее положение на спине, с согнутыми бедрами и коленями, и углом в тазобедренных и коленных суставах около 90°. Такая поза соответствует наилучшей переносимости ускорения, направленного от передней к задней стенке грудной клетки, и во время взлета позволяет предотвратить приток крови к нижним конечностям и помочь сердцу перекачивать кровь в другие отделы тела. Учитывая случающиеся время от времени задержки взлета, экипаж иногда остается в такой позе до 4 часов. Положительное

влияние этого специфического положения на спине заключается в том, что значительное количество крови при этом располагается выше положения сердца, тем самым увеличивая преднагрузку (больше крови находится в венах) и сердечный выброс. После принятия такой позы ударный объем сердца увеличивается в среднем с 75 мл до 90 мл. Организм частично компенсирует эту ситуацию, уменьшая объем циркулирующей крови через стимуляцию мочеиспускания и уменьшение жажды. Одежда космонавтов включает специальное нижнее белье из материала, впитывающего жидкость. Однако некоторые космонавты предпочитают ограничивать потребление жидкости за 12–24 часа до запуска и «взлетать высушенными», чтобы сделать ненужным использование впитывающего белья. Это может сработать на короткое время, однако возникает опасность выхода на орбиту в обезвоженном состоянии. Такое уменьшение объема крови на стартовой площадке может ухудшить способность космонавтов к экстренному выходу и даже вызвать обмороки при быстром переходе в положение стоя. В этом плане уместными выглядят сомнения в том, смогут ли члены экипажа, облаченные в 40-килограммовые скафандры, в случае необходимости быстро эвакуироваться из корабля без посторонней помощи через бортовой люк или иллюминатор после длительного нахождения в предвзлетной позе на спине с согнутыми ногами.

5.2. Функции сердечно-сосудистой системы на ранней стадии космического полета

После запуска космического корабля, в условиях микрогравитации продолжается перераспределение крови в сосудах таким образом, что по сравнению с нормальными земными условиями большее ее количество оказывается в верхней половине

тела – в области головы и грудной клетки. Фактически происходит более равномерное распределение жидкости и более равномерное распределение артериального давления, чем на Земле (рис. 5.1). Такой процесс перераспределения жидкости в организме начинается быстро и практически завершается в течение первых 6-10 часов полета, после чего сохраняется в течение всей его продолжительности. Видимыми последствиями перераспределения крови являются вздутие вен в области головы и шеи, а также отечность вокруг глаз. Астронавты также часто ощущают «полноту в голове» и заложенность носа, похожую на хроническую заложенность носовых пазух при гайморите. Также могут ухудшаться обоняние и вкус, как это происходит на Земле при простуде. Некоторые космонавты также сообщают о боли в глазах при движении глазных яблок в течение первых дней полета в результате повышения внутриглазного давления. Иногда также сообщается о головной боли. Существует подозрение, пока еще недостаточно подтвержденное экспериментально, что происходит подъем внутричерепного давления. Если это так, то внутричерепная гипертензия может являться причиной некоторых симптомов, часто наблюдаемых в ранние сроки полета, например, тошноты.

В начальный период полета в отличие от верхней части тела, ноги испытывают недостаток кровоснабжения, приводящий к уменьшению давления крови в капиллярах. Это приводит к «синдрому куриной ножки», характеризующемуся уменьшением объема нижних конечностей в условиях микрогравитации. Исследования показали, что окружность бедер может уменьшиться на 10-30%, по причине того, что до 2 литров жидкости смещается в верхнюю часть тела. При этом в начале полета уменьшается потребление жидкости космонавтом. Снижение потребления жидкости также может быть связано с синдромом космического укачивания у мно-

гих членов экипажа в течение первых трех дней космического полета. Использование препаратов против укачивания, выполнение работы и многие другие факторы также могут влиять на водный обмен и мочеобразование в космосе.

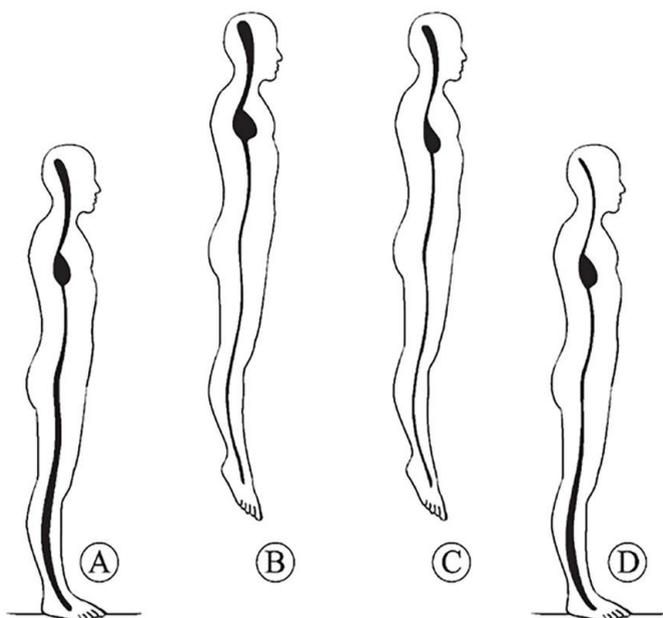


Рис. 5.1. Сдвиг крови во время космического полета (по [11])

На Земле при наличии силы тяжести нижние конечности хорошо снабжаются кровью (рис. 5.1,А). В ранние сроки космического полета в условиях микрогравитации кровь смещается в сторону груди и головы, что приводит к избыточному скоплению крови в верхней части тела (рис. 5.1,В). Это запускает нейрогуморальные механизмы водного обмена, направленные на уменьшение потребления жидкости, стимуляцию мочевыделения и приводящие к уменьшению объема жидкости в организме. В этих

условиях приток крови к сердцу уменьшается (рис. 5.1,С). После возвращения космонавта на Землю возникает приток крови к ногам, а поскольку общее количество крови уменьшилось, ее недостаточно для заполнения всей системы кровеносных сосудов. Это может приводить к возникновению ортостатической гипотензии (рис. 5.1,Д).

Одним из показателей гемодинамики, представляющих особый интерес для космической физиологии и медицины, является центральное венозное давление (ЦВД) – давление в полых венах, крупных венозных сосудах, по которым кровь из системного кровотока возвращается в правое предсердие. По сути дела, ЦВД отражает давление крови, наполняющей правое предсердие перед каждым сокращением (систолой). ЦВД соответствует количеству крови, смещающейся в верхнюю часть тела, и по динамике изменения ЦВД можно понять, насколько быстро происходит перераспределение крови. Первые прямые измерения ЦВД в космическом полете были выполнены во время американской миссии Spacelab в 1993 году, когда один астронавт был запущен с катетером в нижней полой вене, проведенном до области сердца. В ходе последующих миссий Spacelab полученные результаты измерения ЦВД подтвердились. Они указывают на увеличение ЦВД перед стартом, когда космонавты находятся в лежачем положении на спине с согнутыми коленями. Во время старта наблюдалось дальнейшее повышение ЦВД, однако, через минуту после достижения невесомости ЦВД уменьшалось ниже предстартового уровня и в дальнейшем оставалось ниже нормы. Первоначальный подъем ЦВД во время взлета был ожидаем из-за прилива крови к правому предсердию в положении лежа на спине и сдавления грудной клетки при перегрузках. Однако снижение ЦВД ниже нормы в течение одной минуты после перехода к микрогравитации несмотря на то, что кровь в организме продолжала перемещаться в головной конец тела, было совершенно неожиданным.

Снижение ЦВД в условиях микрогравитации свидетельствует о том, что емкость венозных сосудов в области грудной клетки быстро увеличивается для вмещения дополнительного объема крови при пониженном давлении. Это увеличение объема вен, расположенных вблизи сердца, создает дополнительное пространство для венозной крови и может возникать, например, за счет исчезновения веса легких, непосредственно прилегающих к венам и оказывающих на них давление в земных условиях.

5.3. Функции сердечно-сосудистой системы на следующих стадиях космического полета

Сдвиг крови в направлении головной части тела, наблюдающийся с самого начала космического полета, активирует артериальные барорецепторы, которые посылают сигналы в центры регуляции кровообращения головного мозга. В ответ возникают нейрогуморальные реакции, направленные на уменьшение объема циркулирующей крови за счет снижения потребления жидкости и увеличения диуреза. Эти реакции завершаются в течение нескольких дней полета. Установлено, что полная потеря жидкости из сосудистых и тканевых пространств нижних конечностей достигает 1-2 литров (10-15% предполетного объема жидкости). В течение 3-5 дней пребывания в космосе общее количество жидкости в организме стабилизируется на уровне примерно на 2-4% ниже нормального уровня в земных условиях и объем плазмы крови уменьшается примерно на 22%. Интересно, что общий объем воды в организме при этом не изменяется, несмотря на уменьшение объема плазмы и внеклеточной жидкости. Это означает, что два литра жидкости, потерянные в сосудистом и интерстициальном отделах нижних конечностей частично перемещаются во внутриклеточное пространство. Вследствие уменьшения объема цирку-

лирующей крови вследствие снижения объема плазмы и потери массы эритроцитов, космонавт достигает нового состояния внутрисосудистой гидратации, которое, хотя и адаптировано для микрогравитации, является гиповолемическим по своей сути.

Также было установлено, что воздействие микрогравитации приводит к снижению эффективности барорефлексов. Во время космической миссии Spacelab SLS-1 с помощью датчиков, смонтированных в плотно прилегающий шейный воротник, производился мониторинг артериального давления в двух точках шеи. К восьмому дню полета у астронавтов была зарегистрирована значительная тахикардия в состоянии покоя, однако изменение частоты сердечных сокращений на единицу изменения артериального давления оказалось сниженным. Эти особенности были обнаружены у всех исследованных астронавтов.

Отдельный интерес представляют эхокардиографические данные, позволяющие оценить размеры сердца. Оказалось, что в начале полета объем сердца существенно увеличен, из-за увеличения притока крови, поступающей в сердце по венам. В последствии объем сердца медленно уменьшается по мере того, как тело космонавта адаптируется к условиям полета, и в конечном итоге становится даже меньшим по сравнению с его нормальным размером на Земле. Это уменьшение размеров сердца можно объяснить тем, что объем циркулирующей крови теперь уменьшен, и сердцу не нужно перекачивать кровь против силы гравитации. Кроме того, может сказываться и снижение физической активности в условиях полета.

Одним из физиологических показателей, который можно измерить в космическом полете, является максимальная работоспособность сердечно-сосудистой системы. Поскольку количество крови, проходящей через легкие, равно количеству крови, вытекающей из сердца (сердечный выброс), и пропорционально количеству газа, поглощенного легкими, сердечный выброс можно кос-

венно определить, измеряя газообмен. Когда космонавты работали на орбите с максимальной нагрузкой (например, на велоэргометре), потребление кислорода не отличалось от предполетных показателей. Это указывает на то, что максимальная величина сердечного выброса и работоспособность сердечно-сосудистой системы не снижается во время космического полета. Физические упражнения оказались наиболее эффективным методом поддержания физиологического состояния сердечно-сосудистой системы в космосе, а также уменьшения эффектов реадаптации (таких как ортостатическая непереносимость) после возвращения на Землю. Максимальное потребление кислорода после полета, как правило, снижается приблизительно на 16%. Нормальная величина этого показателя обычно восстанавливается до предполетного уровня в течение недели после краткосрочного космического полета. Данные о длительных космических полетах пока недостаточны.

Во время выходов в открытый космос члены экипажа могут работать до 6 часов в скафандре со средней скоростью метаболизма около 800 ккал/час и с увеличением ее до 1500 ккал/час и выше во время отдельных 5-10-минутных интервалов интенсивной работы. Во время типичного выхода в открытый космос члены экипажа теряют 0,7-2,2 кг (в основном за счет потери жидкости). Космический скафандр оснащен жидкостным охлаждением для нейтрализации тепла, выделяющегося при нагрузках. Иногда в этих условиях возникает переохлаждение конечностей, предположительно из-за относительного снижения кровотока в них в условиях микрогравитации. Космонавт может пить через соломинку из небольших контейнеров с жидкостью, расположенных внутри скафандра. Несоблюдение этого требования может привести к быстрому обезвоживанию организма.

Наряду с частотой сердечных сокращений, важным показателем деятельности сердца является сердечный ритм. В земных условиях многие виды сердечной аритмии рассматриваются как

проявления сердечной патологии, однако, в условиях космического полета нарушения сердечного ритма встречаются не так уж редко. Чаще аритмии наблюдаются при выполнении экипажем физических нагрузок или вследствие отрицательного давления в нижней части тела вследствие микрогравитации. Серьезные нарушения сердечного ритма были отмечены у астронавтов во время реализации лунной программы «Аполлон» как при высадке на Луну, так и после возвращения на Землю. Оказалось, что некоторые случаи аритмии являются последствием нарушений электролитного баланса (гипокалиемии) или стресса.

Случаи нарушений сердечного ритма также встречались и при полетах на российских станциях «Мир». Например, у одного из членов экипажа космической станции «Мир-2» (1987 г.) возникла стойкая аритмия во время выхода в открытый космос (рис. 5.2). Это привело к вынужденному сокращению продолжительности полета [12].

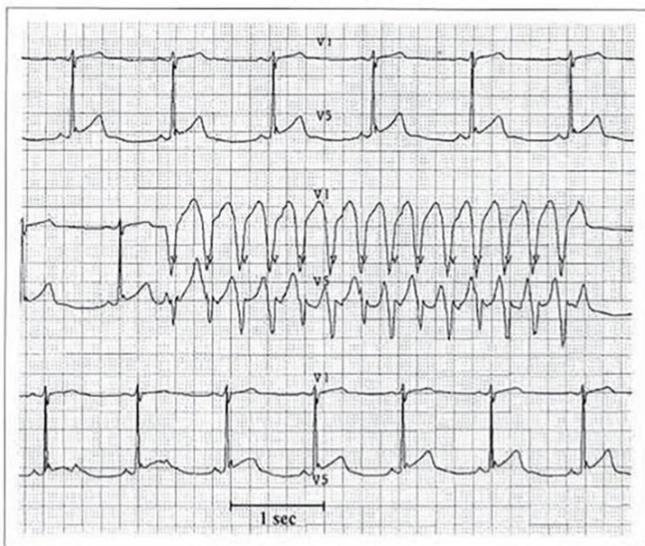


Рис. 5.2. Групповые желудочковые extrasystолы

На ЭКГ члена экипажа космической станции «Мир-2» во время выхода в открытый космос зарегистрированы групповые желудочковые экстрасистолы (на среднем фрагменте записи). Ранее советский космонавт был возвращен с космической станции «Салют-7» в связи с повторяющимися приступами аритмии, появившимися после незначительных технических проблем во время выхода в открытый космос. По информации российского медицинского сообщества, за 10 лет работы станций «Мир» наблюдалась 31 аномалия на ЭКГ и 75 аритмий [12].

5.4. Функции сердечно-сосудистой системы после возвращения из космического полета

Организм космонавтов при взлете и посадке подвергается существенным перегрузкам. Обычно они не превышают 4 g, однако в отдельных случаях бывают значительно сильнее. Например, в мае 2003 г. экипаж корабля «Союз» испытал нагрузки в 8-10 g в течение нескольких минут по причине того, что сбой в автоматической системе приземления привел к спуску по баллистической траектории. Самочувствие космонавтов после приземления было субъективно хорошим, однако, у них была выявлена тахикардия до 100 ударов в минуту.

Несмотря на благополучное завершение этого полета, такие перегрузки представляют серьезную опасность, в особенности для экипажа, заканчивающего длительное пребывание в космосе. Космонавтам грозит церебральная гипоперфузия, способная привести к обмороку.

Даже при обычном приземлении по плавной полубаллистической траектории частота сердечных сокращений и артериальное давление растут при входе в атмосферу и сразу после приземления. В этот период частота сердечных сокращений может

достигать 120 в минуту, а систолическое артериальное давление – 160 мм рт. ст. После приземления космонавтов-новичков тестировали, либо укладывая их на наклонный стол, который быстро перемещался из горизонтального положения в вертикальное, либо путем сравнения частоты сердечных сокращений и артериального давления в положении лежа и стоя. После кратковременного космического полета около 27% членов экипажа не могли пройти 10-минутный стендовый тест в день приземления и вынуждены были сесть, чтобы предотвратить обморок. Существуют две непосредственные причины такой ортостатической непереносимости. У некоторых космонавтов обмороки обусловлены снижением кровоснабжения головного мозга (менее 30 мл/мин на 100 г мозговой ткани), в других случаях они связаны с уменьшением артериального давления (среднее артериальное давление < 40 мм. рт.ст.).

Тахикардия является одной из наиболее выраженных реакций сердечно-сосудистой системы в заключительной фазе космического полета и после его окончания. Очевидно, тахикардия является рефлекторной реакцией, направленной на повышение сердечного выброса и, как следствие этого, артериального давления. Такой характер реакции в данных условиях является наиболее приемлемым. Эксперименты показали, что другие возможные механизмы кратковременного повышения артериального давления (повышение периферического сопротивления сосудов, увеличение ударного объема за счет увеличения сократительной способности сердца), реализующиеся через симпатическую нервную систему, выглядят менее эффективными после космического полета. Снижение чувствительности барорецепторов, приобретенное в условиях микрогравитации, может замедлить реакцию. Согласно некоторым данным [13], ортостатическая непереносимость выявляется чаще после продолжи-

тельного полета (130-190 суток), чем после кратковременного. Вышеописанное тестирование с использованием наклонного стола выявило ортостатическое предобморочное состояние у 5 из 6 космонавтов, вернувшихся из длительного полета, тогда как после кратковременного полета те же симптомы были обнаружены лишь у 1 космонавта из 6.

Глава 6. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА НА КОСТНО-МЫШЕЧНУЮ СИСТЕМУ

Перед изучением материалов данной главы рекомендуется внимательно ознакомиться с физиологией костно-мышечной системы в соответствующем разделе учебника физиологии (например, Агаджанян, Смирнов, 2009 [2], с. 85-97).

В условиях космического полета в костно-мышечной системе возникают значительные изменения. Длительное пребывание в невесомости приводит к потере массы, объема и силы мышц, деминерализации костей. В связи с этим возникает большое количество вопросов. Как долго в условиях микрогравитации продолжается процесс потери мышечной и костной массы? Является ли этот процесс обратимым? Существуют ли физиологические механизмы, направленные на сохранение массы мышц и костей? Насколько параллельная потеря мышечной силы и нарушения координации движений ограничивают трудоспособность космонавтов? В настоящей главе представлены современные данные о влиянии космического полета на структуру и функции опорно-двигательного аппарата.

6.1. Атрофия мышц в космическом полете

Уже через несколько дней пребывания в условиях микрогравитации начинается мышечная атрофия. Объективным признаком начала атрофии мышц является увеличение экскреции соединений азота с мочой. Азот является важнейшим элементом любого

белка, а скелетные мышцы содержат самый большой пул активного белка в организме. Определение экскреции с мочой азота является индикатором распада мышечной ткани. Об экскреции азота с мочой судят по содержанию в ней азотсодержащих веществ 3-метилгистидина, креатинина и саркозина.

Атрофия мышц характеризуется их структурными и функциональными изменениями. В частности, наблюдается снижение размера мышечных волокон без видимых изменений в их количестве. Эти явления встречаются и на Земле при некоторых видах атрофии мышц. В частности, атрофия наступает, если нервные волокна или мотонейроны, иннервирующие мышцу, повреждены или разрушены (денервационная атрофия). В этом случае прогрессивно уменьшаются размеры денервированных мышечных волокон, в них снижается содержание актина и миозина, наблюдается разрастание соединительной ткани вокруг мышечных волокон. Мышца также может атрофироваться с неповрежденной иннервацией, если она не используется в течение длительного времени. Это явление известно как дисфункциональная атрофия («атрофия от бездействия»). Структурные изменения мышц, возникающие после космического полета, напоминают дисфункциональную атрофию. Космические эксперименты на крысах показали уменьшение площади поперечного сечения мышечных волокон на 20-50%, сопровождавшееся потерей сократительных белков. Биохимические и структурные изменения на клеточном и молекулярном уровнях были выявлены и у астронавтов при биопсии мышц, однако эти исследования очень немногочисленны в связи с болезненностью такого исследования.

Популярный косвенный метод оценки структурных изменений мышц заключается в измерении потребления кислорода, коррелирующего с расходом энергии. Известно, что медленные (красные) мышечные волокна используют энергию в первую очередь из аэробных процессов (требующих кислорода). Эта энергия высво-

бождается при расщеплении питательных веществ – углеводов, жиров и белков. Быстрые (белые) волокна больше зависят от энергии, образующейся при анаэробном расщеплении запасов гликогена. Если максимальная кислородная емкость тела снижается в космосе, функция медленно сокращающихся мышц становится не столь эффективной из-за того, что им приходится дополнительно черпать энергию из анаэробных источников. Исследования на животных показали, что антигравитационные медленно сокращающиеся волокна обычно подвергаются наиболее выраженным атрофическим изменениям в ходе космического полета. Кроме этого, в космосе медленные мышечные волокна приобретают определенные свойства быстрых волокон. Такая трансформация, однако, делает мышцы более утомляемыми: чем больше зависимость мышц от анаэробного гликолиза, тем меньше их выносливость и выше утомляемость.

Атрофия мышц в космосе значительно больше выражена в постуральных мышцах, т.е. в мышцах, участвующих в стоянии, ходьбе, подъеме и переносе предметов на Земле. Мышцы рук и плеч характеризуются меньшей атрофией, чем мышцы поясницы, живота, бедра и голени. Очевидно, мышцы нижней части тела имеют решающее значение для поддержания осанки и равновесия на Земле, и больше всего страдают от исчезновения гравитации. Менее выраженная атрофия мышц верхних конечностей также может объясняться более частым использованием рук во время космического полета. Действительно, в состоянии невесомости преимущественно руки используются для перемещения в космических кораблях и во время выходов в открытый космос. Значительная атрофия мышц, сопровождавшаяся соответствующим снижением их силы, была обнаружена всего через 5 дней полета. Во время кратковременных полетов космонавты теряют от 10 до 20% мышечной массы, в ходе продолжительных полетов потеря мышечной массы может возрасти до 50%, если не препятствовать

этому. До сих пор нет однозначных данных о том, достигает ли мышечная атрофия плато в ходе длительного полета. Помимо потери мышечной массы и мышечной силы, также было обнаружено снижение мышечной выносливости в нижних, но не в верхних конечностях. Основными причинами являются недостаточная активность ног в невесомости и пребывание в тесном пространстве.

В качестве индикатора мышечной атрофии обычно используют окружность бедра, однако, следует помнить о том, что уменьшение этого показателя также может быть следствием переноса жидкости из нижней части тела вверх, происходящего в условиях микрогравитации. Уменьшение окружности бедра, известное как «синдром куриных ножек» постоянно наблюдается в условиях микрогравитации. К концу 3 месяца полета окружность бедра может уменьшиться на 10-20%. Частично это уменьшение связано с движением жидкости в направлении головы. Однако, хотя перераспределение жидкости практически завершается к концу первой недели полета, объем ног продолжает уменьшаться на протяжении всего полета, что позволяет предположить, что имеет место потеря мышечной массы. Во время послеполетных измерений объем нижних конечностей не сразу возвращается к предполетному уровню, несмотря на быструю регидратацию организма. Эти данные указывают на то, что объем ноги уменьшается в пространстве частично из-за мышечной атрофии.

Потеря мышечной массы предположительно вызвана изменениями метаболизма мышечной ткани, в частности, изменением скорости синтеза и расщепления мышечных белков. Исследования, проведенные в ходе длительных полетов на станции «Мир», выявили снижение примерно на 15% скорости синтеза белка у космонавтов. Потеря мышечной массы дополняется изменением сократительных свойств и уменьшением силы мышечных волокон. Уже после 6-суточного пребывания в условиях микрогравитации выявляется значительное снижение силы мышц туловища, бедра и

плеча. Характерно, что в большей степени снижается сила мышц-разгибателей, чем мышц-сгибателей. Исследования на животных показали, что регенерация мышечных волокон в космосе снижена. Связанное с этим усиленное выделение азота может иметь вредные гормональные и метаболические последствия.

Поскольку мышцы составляют более 30% массы тела, изменения массы тела во время и после космического полета являются показателем соответствующих изменений мышечной массы. В условиях микрогравитации массу тела измеряют с помощью специального устройства, в котором испытуемый находится на сиденье, помещенном между двумя пружинами с известной постоянной упругостью. Когда сиденье разблокировано, период колебаний пропорционален массе космонавта. Измерения, выполненные на данном устройстве, показали, что масса тела уменьшается примерно на 5% относительно предполетной в течение первых двух недель космического полета. Частично это снижение связано с потерей организмом жидкости. Интересно, что масса тела имеет тенденцию к увеличению во время постельного режима или во время сна. Например, при 135-суточном постельном режиме на Земле с целью имитации длительного космического полета, трое испытуемых набрали от 5,1 до 9,3 кг. По всей видимости это увеличение веса связано с накоплением натрия во внеклеточном пространстве, что приводит к задержке воды.

Космический полет также приводит к повышенному риску повреждений скелетных мышц, вызванных их сокращениями. На Земле такие повреждения чаще всего возникают при мышечной атрофии. В этих условиях способность космонавтов выполнять некоторые виды работ на орбите может быть поставлена под угрозу. Кроме этого, могут возникать проблемы со стороны мышечной системы после возвращения на Землю в условия нормальной гравитации. Мышечная слабость, повышенная утомляемость мышц, нарушения координации, болезненность мышц, которые часто

возникают после космического полета, напоминают симптомы, наблюдаемые у пациентов с постельным режимом и у пожилых людей. Мышечная атрофия, приобретенная в невесомости, в послеполетный период вносит вклад в постуральную неустойчивость и нарушение движений.

Хотя сниженная интенсивность использования мышц во время космического полета вызывает уменьшение их размеров и силы, по возвращении из полета наземные двигательные стратегии быстро восстанавливаются. Это происходит задолго до восстановления поперечного сечения мышечных волокон. Установлено, что центральная нервная система подвергается значительному «перепрограммированию» и за счет пластичности осуществляет компенсаторную активацию двигательных единиц, что маскирует угнетенное состояние мышечной системы.

6.2. Изменения костной ткани в космическом полете

Во время космического полета происходит потеря костной массы в количестве около 1-2% в месяц. Особенно заметна потеря массы костей таза, нижних отделов позвоночника, ног. Некоторые космонавты за время шестимесячных полетов теряли до 20% костной массы нижних конечностей. Более того, после возвращения на Землю потеря костной массы продолжается в течение нескольких месяцев. Во время миссий «Gemini» минеральная плотность костей определялась с помощью рентгеновской денситометрии, которая измеряет ослабление двух пучков рентгеновских лучей кальцием. С помощью этой техники (которая имеет точность 1-2%) в пяточной кости выявлена потеря примерно 2-4% костной массы после 4-11 дней космического полета. Впоследствии во время миссий «Аполло», «Скайлэб» и «Салют» использовался метод однофотонной абсорбциометрии. После миссий «Аполло»

продолжительностью 10 дней наблюдалось снижение костной массы на 3-5%. После полетов «Союз» плотность костей уменьшилась на 8-10%, после полетов «Скайлэб» измерения выявили костную деминерализацию на 1-3% в месяц. На станции «Мир» использовалась методика компьютерной томографии (КТ), позволяющая получить данные о плотности тканей (в г/см³). После годичного полета у одного космонавта была обнаружена потеря 10% трабекулярной структуры кости поясничного отдела позвоночника. Другие космонавты и астронавты, совершившие полет на борту «Мира», были обследованы как до, так и после миссии с использованием двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии, обеспечивающей двумерное измерение массы трабекулярной и кортикальной ткани костей. Эти сканирования показали, что даже в условиях интенсивных физических упражнений, после длительного полета плотность большеберцовой кости снижена на 5,4%. У членов экипажа, не выполнявших физических упражнений, плотность костной ткани снижалась примерно на 1,3-1,5% в месяц. В самых худших случаях после 6-месячного полета снижение плотности костной ткани составило 15-22%.

Важные данные были получены на 15 космонавтах, проводивших 1, 2 и 6 месяцев на станции «Мир» [14]. Минеральная плотность костей измерялась в дистальном отделе лучевой и большеберцовой кости до космического полета и в течение 6 месяцев после миссии. Существенных изменений трабекулярного кортикального слоя лучевой кости не было обнаружено ни в одном из измерений. В отличие от этого, в трабекулярной ткани большеберцовой кости была обнаружена потеря плотности после 2-месячного полета и, в особенности, после 6-месячного полета. Потеря ткани большеберцовой кости сохранялась в течение как минимум 6 месяцев после полета, что позволяет предположить, что время, необходимое для восстановления, превышает продолжительность миссии.

Такая значительная потеря костной массы приводит к увеличению риска переломов, который в пять раз выше ожидаемого при нормальной костной массе в земных условиях. В полете кости могут сломаться под экстремальным напряжением тяжелой работы во время выходов в открытый космос, или после возвращения в условия земной гравитации. Основной причиной потери костной массы является потеря кальция – основного минерала, отвечающего за структуру, прочность костей и определяющего состояние их минеральной плотности. Увеличение экскреции кальция с калом и мочой впервые было отмечено в ходе советских космических миссий на кораблях «Восток». Выведение кальция с мочой и калом резко повышалось и у астронавтов «Скайлэба» параллельно со снижением массы мышц и костей.

Увеличение экскреции кальция с мочой может вызвать возникновение кальциевых отложений в различных органах, особенно в почках. Образование камней в почках, может стать серьезной проблемой в космическом полете. Одновременно с деминерализацией потеря костной массы сопровождается изменениями в костном мозге – важнейшем органе кроветворения.

Некоторые исследования на животных показали, что структура кости, сформировавшейся в космосе, оказывается измененной. У лабораторных крыс, побывавших в космосе, сила не увеличивается пропорционально увеличению размера костей, как это происходит на Земле. Есть все основания предполагать, что и у человека после длительного пребывания в условиях микрогравитации должны происходить аналогичные изменения в костной ткани. В этом случае следует ожидать опасности накопления избытка минералов в тканях, в особенности, в почках, переломов и потенциально необратимых повреждений скелета вследствие потери костной массы. Аналогичная проблема не является редкостью и на нашей планете, где миллионы людей страдают от потери костной массы, хорошо известной медицине под названием остеопороз.

Исследователи надеются, что решение проблемы потери костной массы в космосе даст полезную информацию о том, каковы причины развития остеопороза на Земле, поможет разработать новые методы борьбы с ним.

Грызуны являются популярной моделью для изучения изменений костной ткани в условиях космического полета, несмотря на определенные трудности. Одна из проблем заключается в том, что рост костей у грызунов отличается своеобразием. У человека удлинение костей прекращается после полового созревания, тогда как у мышей эпифизы костей и после этого продолжают оставаться зонами постоянного продольного роста. У крыс скорость роста костей значительно снижается примерно в возрасте от 12 до 14 месяцев (они живут до 3-4 лет), но их корковая кость, в которой отсутствуют сосудистые каналы, не похожа на человеческую. У крыс снижение скорости образования костей наблюдалось после полета с возвращением к контрольным уровням примерно через 4 недели. Интересно, что эти изменения были в значительной степени нивелированы у крыс, подвергшихся центрифугированию в полете. Исследование, выполненное на молодых крысах на борту космической лаборатории «Spacelab», не выявило изменения длины большеберцовой, бедренной и плечевой кости по сравнению с наземными контрольными животными. Другими словами, эти кости у крыс в условиях микрогравитации росли с той же скоростью, что и на Земле. Однако костная масса (следовательно, и ее прочность) оказалась сниженной.

Изменения костной и мышечной ткани, которые происходят в условиях космического полета, можно изучать и в земных условиях. Для этого используется экспериментальная техника, моделирующая два фактора полета: разгрузку задних конечностей и смещение жидкости к головной части тела (рис. 6.1.). В этой установке задние конечности животного приподняты над полом, и таким образом оказываются функционально разгруженными. Си-

стема верхних шкивов имеет шарнир, который позволяет животному двигаться по клетке, используя только передние конечности. Через несколько дней адаптации к позе с подвешенным хвостом животные становятся активными, нормально едят и пьют. Это простая методика относительно быстрой и точной симуляции изменений в мышцах и костях, происходящих во время космического полета. Использование данной экспериментальной модели позволило получить ценные данные об изменениях костной и мышечной ткани на клеточном уровне. Например, запись активности камбаловидной мышцы подвешенных крыс показала немедленное и стойкое снижение сократительной активности на 75%. Через 7 дней в камбаловидной мышце наблюдалось снижение удельного напряжения, медленные волокна приобретали признаки быстрых волокон, а большое количество толстых миозинсодержащих филаментов оказалось утраченным. Была также обнаружена потеря около 25% трабекулярной ткани большеберцовой кости и снижение ее механической прочности на 30%.

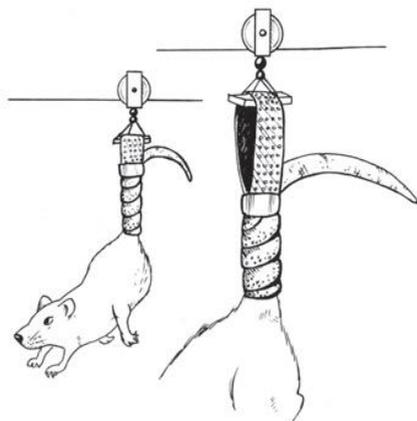


Рис. 6.1. Экспериментальная методика подвешивания крысы для моделирования разгрузки мышц и костей в условиях космического полета (по [15])

На орбите космонавты регулярно выполняют упражнения с отягощениями, которые имитируют действие земной гравитации, тем не менее, трудно подобрать комплекс упражнений, способный полностью предотвратить потерю мышечной и костной массы во время космического полета. В этот комплекс должны входить различные виды упражнений, направленные на поддержание мышечной силы и устойчивости к утомлению и травмам, а также на предотвращение потери костной ткани. Считается, что наилучшим является комплексный подход, сочетающий в себе здоровое питание, лечебные мероприятия, фармакологические препараты и физические упражнения.

Глава 7. ПСИХОСОЦИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРЕБЫВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

В условиях космического полета имеется набор психосоциологических факторов, способных оказать важное, если не решающее влияние на успех миссии. К таким факторам, в частности, относится способность эффективного взаимодействия членов экипажа друг с другом, в особенности с представителями других национальностей и культур, со средой обитания и оборудованием. В настоящей главе подчеркивается важность психического и социального благополучия для успешного выполнения программы как коротких, так и длительных космических полетов.

7.1. Психосоциологические особенности реакций на условия космического полета

Длительное пребывание на борту космического корабля неминуемо сопряжено со стрессом из-за невесомости, изоляции, заключения в замкнутом пространстве и др. Хотя психологические проблемы во время космических миссий, наверняка существуют, сведения о них практически отсутствуют в отчетах. Такие проблемы как тревога, депрессия, психоз, психосоматические симптомы и послеполетные изменения личности были редки или не были методически задокументированы. Имеются отдельные упоминания негативных психологических реакций на космический полет, включая проблемы со сном, снижение физической активности и усталость, расстройства настроения и мышления, изменение чув-

ства времени, плохие межличностные отношения. Межличностные проблемы включают межличностную напряженность, снижение сплоченности с течением времени, потребность в уединении. Тем не менее, ни одна из этих проблем до сих пор, кажется, не оказала влияния на успех космической миссии, вероятно, из-за исключительной мотивации космонавтов. Однако, даже у высоко мотивированных людей есть предел. Согласно данным психологов NASA этот предел дает о себе знать в течение трех или четырех недель. Если после этого у космонавтов возникают межличностные конфликты в замкнутом микросообществе экипажа, ситуация может выйти из-под контроля.

Космический полет требует формирования и поддержания эффективного стабильного взаимодействия в условиях микрогравитации и длительной изоляции в небольшой группе. Индивидуальная корректировка поведения, способность избегать межличностные конфликты, сплоченная групповая деятельность в изолированной и закрытой группе – неперемные условия жизнедеятельности экипажа космического корабля. Однако, подобные условия необходимо соблюдать и в некоторых ситуациях на Земле, таких как работа на удаленных полярных станциях, на подводной лодке и др. В связи с этим еще до наступления космической эры был накоплен богатый опыт психосоциологических правил пребывания людей в таких условиях. Члены полярных экспедиций, проводящие по 8 месяцев на станции, сообщают об увеличении на 40% частоты связанных со стрессом симптомов тревоги, депрессии, бессонницы и враждебности. В космосе, где дополнительно присутствует стресс от длительной изоляции и невесомости, могут появиться дополнительные симптомы кроме враждебности и беспокойства. Астронавты часто жалуются на различные психосоматические симптомы, в том числе нарушение сна, дезориентацию во времени и головные боли. В истории космонавтики известны случаи, когда «сжатие» рабочего времени и

плотный график работы экипажа приводили к раздорам между астронавтами и командой наземного управления полетом, из-за нетерпения членов команды управления на Земле, требовавших спешки от космонавтов. Эти проблемы усугубляются трудностями жизни в условиях микрогравитации, трудностями с гигиеническими процедурами, непривычным вкусом еды и необходимостью добавлять в пищу большое количество специй, ограниченной конфиденциальностью, шумной обстановкой. Физические упражнения, которые необходимо выполнять космонавтам, сопряжены с отсутствием возможности принять душ, заменой его влажной губкой, необходимостью собирать пот. Все это вызывает стресс у космонавтов и, таким образом, влияет на межличностное взаимодействие, концентрацию и способность выполнять групповую и индивидуальную работу.

По мере того, как космические полеты становятся длительнее и все более рутинными, следует ожидать роста проблем с последствиями изоляции и с психосоциологической адаптацией. В полете малейшее нарушение производительности и поведения космонавта может иметь трагические последствия для миссии.

Как правило, когда речь идет об отдельном человеке или небольшой группе лиц, изъятых из привычной социальной среды и помещенных в изолированное и ограниченное пространство, следует ожидать возникновения проблем, которые делятся на четыре группы. К первой группе относятся ментальные проблемы: снижение внимания и концентрации, проблемы с обучением и галлюцинации. Эти проблемы выглядят опасными при работе в космосе. Например, если пропустить включение сигнальной лампы, может произойти катастрофа. Вторая группа проблем связана со снижением мотивации, когда индивидуальное или групповое восприятие вознаграждения за работу в космосе кажется недостаточным. Действительно, по сравнению с ранними полетами, где к астронавтам относились как к героям, современ-

ные полеты становятся все более рутинными. Таким образом создается ситуация, когда вознаграждение воспринимается как недостаточное. Третья категория проблем – это соматические жалобы, такие как нарушение сна, головные боли, расстройство желудка и запоры. Все эти жалобы имеют объективную основу в физической природе окружающей среды, но могут усугубляться необычно высоким уровнем стрессирования в этой среде. Изменения в настроении и моральном состоянии составляют четвертую категорию проблем.

В целом лучшими психосоциологическими аналогами космического корабля считаются антарктические станции. Их объединяет экстремальный характер окружающей среды, длительность пребывания (на зимовке – 6-8 месяцев). В этот период крайне ограничены контакты с внешним миром, зимовщики заперты в своих комнатах из-за экстремальных температур. Работа на полярных и космических станциях имеет схожие научные и политические цели; характер работы также похож (научная, разведочная и вспомогательная). Экипажи в обоих случаях неоднородны (военные и гражданские мужчины и женщины, ветераны и новички) и обладают высоким уровнем квалификации. Имеется сходство в организации (разделение труда, руководство) и ротационной структуре командировок. Работа в космосе и на полярной станции также похожа в том, что она проходит в опасной окружающей среде, является напряженной, а команда неоднородна, замкнута и изолирована от общества. Из-за этого сходства, данные исследований в Антарктиде служат одним из основных источников сбора психосоциологических данных для МКС и межпланетных полетов.

Интересно отметить, что в течение первых нескольких недель пребывания в Антарктиде межличностные проблемы как правило не возникают. Когда на станцию прибывают новички, им не хватает знаний о деталях предстоящей работы и окружения,

чтобы сформулировать свои собственные идеи, поэтому они готовы следовать всему, что предлагает руководитель. После того, как первоначальный шок от окружающей среды проходит, и члены команды немного лучше узнают свое окружение, они порой начинают бунтовать против руководства и портить отношения друг с другом. После середины зимней изоляции часто портится настроение, что описано как «феномен третьей четверти». Этот феномен скорее является психосоциальным, чем экологическим по своей природе, и не зависит от продолжительности миссии. Он является результатом осознания того, что миновала лишь половина периода зимовки и остается еще такой же период изоляции на станции. Один из методов, используемых психологами для оценки последствий изоляции во время зимовки в Антарктиде, является анализ дневников членов команды. Предполагается, что частота упоминания проблемы в дневнике, отражает важность этой проблемы для зимовщика. Анализ девяти дневников из нескольких экспедиций во французском секторе Антарктиды (от 69 до 363 дней), написанных начальниками станций, медицинскими работниками и техниками, отвечающими за связь, ясно указывает на более негативный опыт в течение третьего квартала зимовки на антарктической станции независимо от продолжительности экспедиции. При группировке проблем по категориям наибольшее количество записей в дневнике и их предполагаемая важность касалась беспокойности групповым взаимодействием, общения, рабочей нагрузки, отдыха и досуга, медицинского обслуживания, а также лидерства.

Кроме полярных станций, большое количество данных, способствующих пониманию психосоциальных аспектов человеческого поведения в космосе была получена в результате изучения других модельных сред, таких как подводные лодки, буровые установки, небольшие изолированные сельские поселения, тюрьмы и т.п. Эти аналоги не могут обеспечить идеального моделиро-

вания космической среды, например, в них отсутствует микрогравитация. Есть также различия в отношении процедур отбора и численности команды, личностных характеристик ее членов, целей и продолжительности миссии. Несмотря на эти различия, исследования в аналоговой модельной среде являются единственным способом изучить на Земле поведенческое воздействие изоляции и стресса в течение длительного времени. Хорошим объектом для изучения являются атомные подводные лодки, которые находятся в центре внимания аналоговых исследований для моделирования условий длительного космического полета из-за изоляции, опасности, напряженной службы, замкнутого пространства. В то время как дизельные подводные лодки обычно остаются под водой лишь относительно короткое время, атомные подводные лодки иногда проводят в подводном положении несколько месяцев, что близко к продолжительности космического полета. Известно, что уровень заболеваемости психическими болезнями среди экипажа атомных подводных лодок относительно невелик: около 20-50 случаев на 1000 человек. Психиатрические симптомы, чаще наблюдаемые у подводников, включают тревогу, межличностные проблемы, проблемы со сном, снижение работоспособности, депрессию. В целом невысокая встречаемость этих проблем может быть связана с тем, что подводники являются тщательно отобранными, проверенными и обученными людьми. В состав экипажа подводной лодки также входит медицинский работник, имеющий специальную подготовку в области психиатрии и способный оказать квалифицированную помощь при первых признаках появления соответствующих симптомов.

Время от времени выполняются исследования по моделированию жизни и работы в наземной копии космической станции в течение длительного времени. В частности, в таком исследовании, выполненном Европейским космическим агентством (ЕКА) в 1990 г., получены психологические данные о повседневной дея-

тельности экипажа «космонавтов» в течение длительного времени. Экипаж состоял из шести мужчин-представителей разных государств-членов ЕКА. Все испытуемые были гражданскими лицами, имевшими опыт работы в науке и технике. Их поместили на четыре недели в макет корабля и контролировали «наземной» командой управления. Результаты проведенных психологических тестов не показали никаких признаков серьезных социальных или эмоциональных конфликтов во время эксперимента. Однако, были выявлены значительные изменения в общении и социальном взаимодействии между членами экипажа по ходу эксперимента. В начале «полета» все испытуемые относительно равномерно участвовали в общении. Однако, в конце исследования субъект, оказавшийся наиболее доминирующим после командира, был практически полностью изолирован от общения, а коммуникация остальных членов экипажа между собой также резко уменьшилась и практически ограничивалась двусторонним общением с командиром. Несмотря на эти проблемы, было замечено, что все добровольцы к концу испытания демонстрируют признаки агрессивного отношения к «наземной» контрольной группе, объединяясь при общении с ней в единое сплоченное сообщество.

В более позднем эксперименте с использованием 240-дневной изоляции на симуляторе космической станции «Мир» (SFINCSS-99) были исследованы социальные взаимодействия внутри экипажа из пяти стран (России, Канады, Японии, Австрии и Франции), состоящего из мужчин и женщин. Члены экипажа выполняли разные программы полета и были размещены в относительно изолированных модулях. Как и следовало ожидать, несколько раз возникали инциденты, которые можно расценивать как конфликтную ситуацию между членами экипажа. Например, на новогоднем утреннике произошла стычка, и канадская женщина обвинила российского члена экипажа в сексуальном домогательстве. Командир экипажа проинформировал об инциденте «наземную» группу

управления и предложил вывести двух испытуемых из исследования или закрыть люк между двумя модулями. В соответствии с его просьбой, люк между камерами был закрыт. С этого момента появилось недовольство членов экипажа «пассивной поддержкой и неспособностью справиться с кризисом» со стороны группы «наземного» управления. Один доброволец выразил желание покинуть камеру и сделал это.

Результаты этих и некоторых других исследований согласуются с тем, что порой наблюдается в реальных космических полетах. В частности, во время некоторых космических полетов и поллярных зимовок проявлялся так называемый синдром «мы против них». Удаленность центрального управления, по-видимому, вынуждает экипаж полностью принимать на себя ответственность за происходящее на корабле. Когда это происходит, члены экипажа начинают считать «внешнюю власть» ненужной, и, если центральная власть навязывает себя команде, может возникнуть конфликт. Характерным примером является мятеж астронавтов «Skylab-4» против Центра управления полетами. Все астронавты миссии «Skylab-4» были новичками. После выхода на орбиту, Центр управления полетами передал им такой же плотный график работ, как у их предшественников. После того, как жалоба астронавтов на тяжелую нагрузку не привлекла должного внимания со стороны наземных диспетчеров, члены экипажа объявили внеплановый выходной и сообщили о выключении связи с центром на время отдыха. Этот мятеж привел к необходимой корректировке рабочей нагрузки и к новому правилу, согласно которому по крайней мере один член экспедиционного экипажа на борту станции должен быть ветераном космических полетов.

В СССР первая пилотируемая космическая станция «Салют-1» была запущена в 1971 г. С этого времени было получено несколько сообщений о разногласиях между экипажем и Центром управления полетами в виде «навязывания» определенных действий

экипажу. Эти ситуации обычно объясняются перегрузкой космонавтов работой и являются проявлениями астении, психической усталости. Астения включает в себя гиперчувствительность, раздражительность и сниженную активность, которые порой сочетаются с бессонницей и психосоматическими симптомами. Она чаще наблюдается при монотонной работе в поздний период полета. Если признаки астении выявлены у членов экипажа, обычные меры ее купирования включают изменение рабочего графика в сторону предоставления большего количества свободного времени, увеличение количества аудиовизуальных сеансов с друзьями и семьей. Еще одна проблема, изредка появлявшаяся на борту советских станций, - межличностное напряжение. Эта проблема, однако, редко возникала на борту Советских станций, что объясняют склонностью советских людей к коллективизму, заставляющему космонавтов подавлять враждебные чувства друг к другу в интересах успешного выполнения миссии. Однако и в ходе полетов российских экипажей проблемы межличностного характера на борту являются редкостью.

Условия длительных космических полетов увеличивают возможность появления раздражительности, депрессии, нарушений сна, группового и индивидуального снижения работоспособности. Во время совместного российско-американского полета («Мир»-NASA, март 1995 г. - июнь 1998 г.) возникла напряженность между экипажем и персоналом в Центре управления полетами. Анализ ситуации позволил выявить несколько факторов, которые к этому привели: продление миссии на 6 недель, недостаточный контроль за графиком работ, работа с перегрузкой, социальная изоляция, смерть члена семьи астронавта, опасная атмосфера (утечка этиленгликоля и загрязняющих веществ), возгорание, декомпрессия (потеря модуля), потеря мощности, нестабильная работа системы связи, претензии к персоналу в Центре управления полетами (синдром «мы против них»), межличностные трения.

7.2. Принципы отбора членов экипажа для космического полета

7.2.1. Индивидуальный отбор членов космического экипажа

Успех космической миссии всегда существенно зависит от особенностей индивидуального и группового поведения членов экипажа. Первоочередное внимание при рассмотрении влияния отдельных факторов на адаптацию к условиям космического полета уделяется проверке и отбору предполагаемых участников миссии. На основании опыта, полученного при анализе данных полярных экспедиций, предпочтение отдается людям, имеющим опыт жизни и работы в новой среде и являющимся научными исследователями. Такие люди способны жить и работать автономно без непосредственного контроля. Космонавт также должен обладать достаточным уровнем коммуникативности и способностью принять одного лидера команды. Во враждебной среде есть место для индивидуальности с лидерскими качествами, но не для слишком большого количества «вождей». Эти принципы могут быть эффективно применены к космическим полетам. Космонавт должен хорошо знать среду, в которой он будет проводить большую часть времени, а также должен быть заинтересован в успехе миссии, частью которой он будет являться. По некоторым данным [16], в условиях антарктической зимовки интроверты, характеризующиеся как более замкнутые в себе, тихие, уединенные личности, лучше приспособляются к экстремальной обстановке и продуктивнее работают, чем экстраверты.

Предполетное обучение должно быть как дидактическим, так и эмпирическим. Его цель состоит в том, чтобы привлечь внимание как членов экипажа, так и наземного персонала к влиянию социокультурных факторов, в частности таких как культурные и

языковые различия. Упражнения по построению команды и разрешению конфликтов также должны быть включены в предполетную подготовку.

Стратегия отбора в команду на индивидуальном уровне преследует две цели: исключить непригодных или потенциально непригодных кандидатов, и отобрать из оставшихся наиболее квалифицированных кандидатов, которые будут оптимально работать. Поэтому отбор производится по критериям исключения и включения в команду.

Прежде всего отсеиваются кандидаты с любым психическим расстройством в анамнезе, с текущими психическими симптомами или другими признаками, указывающими на риск психического расстройства во время космического полета. Таким образом, критерии исключения – это медицинские критерии, определяющие психические расстройства, которые влекут за собой дисквалификацию. Эти расстройства включают шизофрению, депрессию, истерию, психопатию, манию, паранойю, психастению, социальную интроверсию, и т.д. На этом этапе процедура отбора опирается на формальные клинические оценки и данные стандартизированных психометрических тестов. Клинические оценки обычно имеют форму структурированного психиатрического интервью, по крайней мере, с двумя независимыми психиатрами. Каждый психиатр задает тот же вопрос в том же порядке и обычно аналогичным образом, чтобы избежать проблемы, известной как предвзятость интервьюера. Собеседования проводятся так, чтобы противодействовать стремлению соискателей минимизировать психологические симптомы («оставаться чистым»). Например, вместо того, чтобы формулировать вопрос следующим образом: «Были ли у вас когда-нибудь депрессии?», на который большинство опрошиваемых осознали бы, что быть в депрессии нехорошо, и, вероятно, ответили бы отрицательно, вопрос формулируется в форме просьбы: «Укажите то время, когда вы были наиболее печальны в своей жизни».

При ответе на такой вопрос субъекту трудно уклониться от предоставления некоторой клинической информации.

Кроме психиатрического интервью кандидат подвергается испытанию с помощью серии психометрических тестов. Эти тесты включают самоотчеты и опросники, такие, как например Миннесотский многофазный личностный опросник (MMPI). Эти тесты стандартизированы по отношению к нормальной популяции, и большинство из них содержат встроенные шкалы, позволяющие определить, подделывают ли кандидаты ответы на тест в желании скрыть патологию. Другие тесты пытаются создать ситуацию, в которой могут быть отражены психологические проблемы заявителя. Такие проективные личностные тесты включают, например, тест на чернильные пятна Роршаха, где определяются и ранжируются ассоциации субъекта при виде неоднозначных чернильных пятен. В других проективных тестах оценивают результаты выполнения задания испытуемым, которому предлагается нарисовать человека или завершить предложение. Статистика показывает, что, используя эти тесты, удается выявить признаки психических расстройств среди кандидатов в астронавты в 8-9% случаев.

После отсеивания кандидатов с неподходящими характеристиками начинается второй этап отбора – выявление наиболее подходящих кандидатов для планируемого полета. В основе данного этапа отбора лежат характеристики, которые обещают оптимальную производительность труда в условиях замкнутого и враждебного космического пространства. На этом этапе уже не учитываются конкретные медицинские или психиатрические характеристики, вместо этого отбор производится на основании психологической идентификации тех желательных личностных черт, которые связаны с конкретной миссией («лучший человек для этой работы»). Процесс напоминает отбор кандидатов, подавших заявку на квалифицированную работу, когда учитываются способности к выполнению этой работы, уровень интеллекта, способность работать в ко-

манде и т.д. Кроме того, учитывая экстремальные трудности космического полета, оцениваются такие качества, как способность переносить стресс, обучаемость и гибкость, а также мотивация к выполнению миссии. В плане профилактики возможных конфликтов оцениваются чувствительность по отношению к себе и другим людям, эмоциональная устойчивость, зрелость, способность формировать стабильное качество межличностных отношений, потенциальная способность решения социологических проблем.

Отбор членов экипажа был довольно простым в первых космических полетах, где требования к экипажу ограничивались высокими навыками пилотирования, хорошей стрессоустойчивостью (к перегрузкам, пониженному давлению, высокой температуре и другим стрессорам), способностью принимать решения и выраженностью мотивации к успеху миссии. Однако, когда впоследствии космические программы потребовали космонавтов с инженерным, научным или медицинским образованием, а навыки пилотирования стали не столь важны, критерии отбора стали более сложными. Эти критерии стали видоизменяться на основании соответствия или несоответствия оценки деятельности космонавтов во время космических полетов результатам предполетных критериев отбора. Некоторые критерии пришлось серьезно переработать и количественно изменить программу отбора. В частности, оказалось, что психологические тесты, применявшиеся в прошлом, не позволяют достоверно предсказать производительность труда индивида в космическом полете.

Примером эволюции процедуры отбора кандидатов может служить ее последовательное изменение в американских космических программах. При психологическом тестировании кандидатов в раннюю космическую программу «Меркурий» два психиатра затратили более 30 часов на обследование каждого кандидата. Это время было затрачено на психометрические тесты (оценка мотивации и свойств личности) и тесты на результативность (оценка ин-

теллектуальных функций и специальных способностей). Психологические реакции кандидатов в рамках программы «Меркурий» также отслеживались во время стресса в экспериментах, моделирующих некоторые условия миссии, такие как изменение давления, изоляция, шум и вибрация, а также тепловое воздействие. Во время более поздних космических программ «Gemini», «Apollo» и первых «Шаттлов» процедура психологической оценки кандидата была сокращена до 10 часов, а количество психометрических тестов уменьшилось с 25 до 10. В программе «Shuttle» на второй стадии отбора использовались лишь критерии для предотвращения возможного деструктивного поведения, и продолжительность тестирования не превышала 3 часов. После успеха предыдущих космических программ, в программе «Shuttle» психологические тесты практически перестали проводить для кандидатов, демонстрирующих наивысший уровень квалификации.

За многие десятилетия полетов человека в космос удалось собрать богатые данные психологической оценки личности кандидатов. В США наиболее популярной методикой является тестирование с помощью Миннесотского многофазного личностного опросника (MMPI). Этот тест состоит из 566 вопросов, на которые субъекта просят ответить, согласен он с этим утверждением или нет. Этот тест используется главным образом для выявления психических расстройств; тест также включает шкалы достоверности для определения того, честно ли испытуемый отвечал на вопросы. Примечательным оказалось, например, сходство результатов тестирования всех четырех групп претендентов – на участие в программах «Mercury», «Gemini», «Apollo» и «Shuttle» в течение тридцати лет. Все группы продемонстрировали результаты, свидетельствующие о высокой настороженности и дефенсивности, а также о желании представить себя в лучшем свете. Во всех группах кандидатов выявлен низкий уровень социальной интроверсии по сравнению с обычным населением, что предполагает высокий уровень социаль-

ной экстраверсии у кандидатов. Неамериканские кандидаты на участие в американских космических программах демонстрировали похожие результаты тестирования несмотря на то, что баллы ММРІ, для населения в разных странах могут несколько различаться из-за культурных особенностей. Результаты кандидатов-женщин на участие в программе «Shuttle» оказались похожими больше на результаты кандидатов-мужчин, чем обычного женского населения. Основным отличием результатов тестирования российских космонавтов по сравнению с американскими оказалась большая склонность россиян к выражению эмоций, что противоречит существующему бытовому представлению об их низкой эмоциональности.

Таким образом, хотя психометрические тесты в первую очередь используются для выявления психопатологии у кандидатов, они также помогают выявить общность и различия черт личности, а также социокультурные особенности. Учет этих общих черт и различий способствует правильному отбору команды и помогает профилактике психологических и социологических проблем, которые могут возникнуть во время космической миссии. Однако психиатрическая экспертиза сама по себе оказалась не особенно полезной в отборе кандидатов. Хотя психиатрическая экспертиза является обязательным этапом отбора, характеристика тех качеств личности, которые в наибольшей степени соответствуют задачам миссии, тщательно проверяется в процессе анализа поведения и производительности во время предполетных тренировок. Поскольку в настоящее время космические полеты выполняются группой людей, важным аспектом процесса подбора экипажа является решение социальных и культурных вопросов группового взаимодействия.

7.2.2. Формирование команды

Правильное формирование команды космического экипажа является непростой задачей. Есть много факторов, которые могут

повлиять на сплоченность и производительность труда экипажа: культурные особенности, лидерство, пол, возраст, личная привлекательность, эмоциональная устойчивость, компетентность, готовность к сотрудничеству, социальная универсальность и др. Основные принципы формирования команды были разработаны на основании результатов моделирования космического полета в аналоговой среде с контрольными группами.

В процессе формирования команды особое внимание уделяется социологическим факторам. Один из таких факторов заключается в обеспечении личного пространства в условиях изоляции в космическом корабле. Модельные наземные исследования позволили установить, что психологические нарушения возникали, когда доступный объем был ограничен до $1,42 \text{ м}^3$ на одного человека на 1 или 2 дня в изоляции, $7,36 \text{ м}^3$ на одного человека на 1 или 2 месяца и $17,0 \text{ м}^3$ на человека в течение более 2 месяцев. Интересно, что за исключением космических станций, обитаемый герметичный объем в большинстве космических аппаратов меньше этих значений. На ощущение личного пространства влияет также количество членов экипажа, находящихся на борту. С увеличением численности экипажа требуется больший объем пространства в расчете на одного человека. Тем не менее, в космическом полете члены экипажа, как правило, уделяют большое внимание работе и мало заботятся об обеспечении личного пространства для отдыха. Утомление от работы приводит к тому, что космонавты обычно предпочитают пассивный отдых, не требующий большого пространства. Аналогичным образом можно объяснить и недостаточный энтузиазм космонавтов при выполнении физических упражнений.

При разговоре двух человек друг с другом, собеседники склонны произвольно выбирать определенное расстояние друг от друга. Вокруг каждого человека как бы создается невидимая граница, за которую не должны проникать другие люди. Если кто-то перей-

дет эту границу, человек обычно начинает испытывать дискомфорт и отходит, увеличивая дистанцию с «нарушителем» (главным исключением являются члены семьи и близкие.) Средняя личная дистанция варьируется от культуры к культуре. Латиноамериканцы, французы, итальянцы, арабы общаются на более близких расстояниях, чем американцы, англичане, шведы, немцы или японцы. Особенности использования физического или зрительного контакта также может различаться в разных культурах. Хотя во многих культурах зрительный или физический контакт является способом общения, в других культурах такие виды контакта могут вызвать дискомфорт и даже указывать на сексуальный подтекст.

При сравнении необходимой личной дистанции в различных условиях было установлено, что дополнительное личное пространство требуется: а) в маленьких комнатах (по сравнению с большими); б) в помещениях (по сравнению с улицей); в) в условиях высокой тревожности (по сравнению с низкой тревожностью); г) с людьми, с которыми, ожидается длительное взаимодействие (по сравнению с кратковременным взаимодействием). Все эти факторы (маленькие комнаты, нахождение внутри помещения, высокая тревога, длительное общение) в полной мере проявляются во время космических полетов. Следовательно, личная дистанция должна увеличиваться в условиях космической миссии.

Ограниченные размеры космического корабля не способствуют уединению и личному пространству. Однако, наземные исследования показали, что уединение, по-видимому, снимает тревогу и стресс лишь на короткое время. В длительных миссиях, даже с возможностью уединения, при доступе (для разговора, социального взаимодействия) к другому человеку в группе, уровень стресса выше. Это является верным и для реального космического полета. Неудивительно, что по некоторым данным с вопросами личной гигиены и ведения личного быта было связано около 40% инцидентов во время космических полетов американских экипажей.

Важным фактором, оказывающим на взаимодействие и производительность труда экипажа, является половая принадлежность членов экипажа. Несмотря на то, что в условиях полярных экспедиций и при длительных исследованиях подводной среды женщины показали равные или даже превосходящие результаты по сравнению с коллегами-мужчинами, общее количество женщин-космонавтов и астронавтов до сих пор не превышало 20% от количества мужчин. Несомненно, присутствие женщин на борту может повлиять на взаимодействие, производительность труда и успех космической миссии. В этом аспекте имеет значение, в частности, общая численность экипажа. Хорошо известно, что в условиях скопления людей мужчины и женщины ведут себя по-разному. Женщины склонны воспринимать маленькие многолюдные места как дружелюбную обстановку, располагающую к общению, в то время как мужчины склонны реагировать на такое окружение как на раздражающее и некомфортное. Мужчины чаще чувствуют, что в многолюдных местах их личное пространство нарушается, такая обстановка воспринимается ими как вызов мужскому доминированию. Таким образом, мужчины с большим раздражением и враждебностью реагируют на длительное пребывание в многолюдной среде, чем женщины. Стоит заметить, что смешанные группы имеют тенденцию почти так же хорошо реагировать на многолюдную обстановку, как и группы, состоящие только из женщин.

В состав команды антарктических экспедиций женщин начали включать с 1979 года, но во многих случаях им до сих пор отказывают в участии. Тем не менее результаты исследований свидетельствуют о том, что присутствие женщин оказывает положительное влияние и препятствует определенным видам деструктивного поведения (например, пьянству и дракам), которое может привести к травме или групповому конфликту. Однако, следует учитывать и результаты многочисленных экспериментов на животных, в кото-

рых было установлено, что введение самки в группу самцов часто вызывает дестабилизацию взаимоотношений и конфликты. С увеличением продолжительности будущих космических миссий, сексуальная напряженность и предубеждения могут стать причиной трений между членами экипажа, оказывающих отрицательное влияние на сплоченность экипажа и производительность труда.

Определенный дестабилизирующий эффект могут иметь гендерные стереотипы членов экипажа. Имеются свидетельства того, что некоторые мужчины-астронавты и космонавты до сих пор придерживаются устаревших взглядов на женщин, скептически оценивая их способности и возможности. Такие стереотипы снимаются в процессе совместной предварительной работы членов экипажа над проектом космического полета, когда каждый член команды имеет возможность продемонстрировать свои способности, компетентность и техническое мастерство.

Планируемые в будущем продолжительные межпланетные миссии требуют новых подходов к гендерному составу экипажа. Вызывает серьезные сомнения использование полностью мужского экипажа в течение такого длительного времени полета. Обсуждается возможность участия в таких миссиях супружеских пар, а также гендерно смешанных экипажей с не состоящими в браке членами. Но что, если во время полета два члена экипажа влюбляются или ссорятся друг с другом? Как должны при этом вести себя другие члены экипажа? Мужчины считаются физически сильнее, с другой стороны, женщины более выносливы психологически. Отсутствие возможности быстрого возвращения экипажа в случае необходимости заставляет рассматривать все возможные альтернативы набора оптимального гендерного состава экипажа. Необходимы дальнейшие исследования, направленные на понимание психологических и социальных последствий взаимодействий и проявления сексуальности в смешанных гендерных группах.

Полеты на МКС, и исследовательские миссии будущего предполагают возможность более широкого представительства разных национальностей в космосе. Это связано с определенными проблемами, которых не было в условиях более однородного национального представительства экипажа. Международные экипажи, выполнявшие полеты по российской и американской космической программе, как правило, участвовали в кратковременных миссиях, поэтому возможные проблемы не успевали проявляться в существенной степени. Ожидается, что проблемы, связанные с межкультурными взаимоотношениями, могут стать более острыми с увеличением продолжительности полета. Это связано с тем, что в таких условиях ярче будут проявляться межкультурные различия в убеждениях, ожиданиях и поведении членов группы на организационном, профессиональном или национальном уровне. Помимо описанных выше различий в представлениях о личном пространстве, существуют значительные национальные различия в отношении, такие как отношение к иерархическому руководству, необходимости соблюдения правил и процедур. Еще одно известное межкультурное различие относится к восприятию времени: англосаксы обычно делают акцент на графиках работы и встреч, сегментации расписания и оперативности, в то время как ближневосточная и латинская культуры в этом отношении являются более гибкими и чувствуют себя более непринужденно, когда несколько дел происходят одновременно. Такие различия, очевидно, могут вызвать проблемы с безопасностью, производительностью и взаимодействием между членами экипажа.

Уроки, извлеченные из международной программы «Мир»-NASA с мультикультурным экипажем, иллюстрируют трудности, с которыми можно столкнуться. Некоторые американские астронавты отмечали, что в условиях сильного стресса, например, во время длительной миссии, межкультурные различия могут нарушить гармонию между членами экипажа. Основные трудности, на

которые они обращали внимание, были следующими: а) языковые различия приводили к недоразумениям; б) особенно сложно быть единственным представителем своей культурной группы; в) астронавты жаловались на длительные периоды отсутствия контактов с англоговорящими и на недостаток контактов с семьей; г) ограниченный выбор продуктов питания; д) часто не было разрешения эксплуатировать оборудование в российском сегменте станции; е) в этом сегменте с ними обращались как с гостями, а не как с равноправными рабочими участниками экспедиции. Фактически астронавтам или космонавтам, оказавшимся в подобной ситуации, приходится пройти три классических этапа культурной интеграции [17]. Первый этап – вход в среду. На этом этапе новизна окружающей среды препятствует проявлению проблем адаптации. Второй этап – «регулировка». На этом этапе человек обучается новым способам мышления и действия, и степень тревоги и разочарования в окружающей среде высока. Третий стадия – адаптация. На этом этапе человек осознает беспочвенность некоторых своих ожиданий и привыкает к реальной ситуации.

Длительное совместное пребывание в космосе наверняка будет связано с необходимостью преодоления межкультурных различий, которые могут включать трудности в понимании невербальных сигналов, трудности в адаптации к новым режимам работы и технические языковые трудности. По этой причине обучение культуре и образу жизни друг друга является неотъемлемой частью подготовки к любой длительной международной космической деятельности.

Экипаж космического корабля можно рассматривать как небольшую социальную систему, сформированную несколькими детерминантами, ни одна из которых, рассматриваемая изолированно, не может однозначно объяснить особенности в поведенческих взаимодействиях или эффективности работы. В этих условиях огромную роль играет правильный выбор руководителя экипажа.

Руководитель организует, направляет и координирует работу членов экипажа. Его деятельность направлена на то, чтобы помочь группе поддерживать гармонию и стабильность взаимоотношений, правильно ставить цели и интерпретировать условия, которые помогают и затрудняют их достижение, отвечать на возникающие вызовы. Эффективный руководитель позволяет членам команды выполнять работу с минимальным вмешательством, но своевременно распознает, когда возникает необходимость в групповой деятельности и правильно организует эту деятельность. Хороший лидер также способен эффективно сочетать автократический (т.е. принимать решения, не запрашивая мнения подчиненных) и демократический стили руководства. Рецепты хорошего руководства заключаются в правильном выборе и подготовке лидера. Однако они также касаются подбора и подготовки других членов команды, структурирования их социальных настроек в соответствии с задачами. Одна из потенциальных причин конфликтов в современных космических полетах, заключается в том, что лидер назначается вышестоящим руководством, а не членами экипажа. Эта причина, однако, сглаживается благодаря наличию открытого общения между членами экипажа. Общение имеет важное значение, поскольку оно обеспечивает обновленные знания о взглядах и личностных характеристиках других людей, что необходимо для их социального сравнения и предотвращения конфликтов. Сбои и недопонимания в процессе коммуникации могут способствовать межличностным трениям и конфликтам внутри экипажа или между экипажем и наземным персоналом.

Важным фактором, способствующим успеху миссии, является четкое целеполагание. Накопленные данные недвусмысленно показывают, что четкий набор привлекательных целей является мощным средством ориентации членов команды на их достижение. Общие цели побуждают людей координировать свои действия для достижения взаимной выгоды и, следовательно, могут поло-

жительно влиять на тон межличностных отношений внутри группы. Однако недостаточно просто навязать их сверху, каждый член экипажа должен чувствовать свою персональную приверженность этим целям. Кроме того, при длительных миссиях необходимо найти средства для поддержания интереса космонавтов к отдаленным целям в течение длительных периодов времени. Если этого трудно достичь, можно установить ряд промежуточных целей, последовательное достижение которых дает положительный эффект. В экипаже, состоящем из группы космонавтов, должны быть лица, способные играть в коллективе связующую, «пограничную» роль. Такие члены экипажа помогают правильно интерпретировать интересы и заботы всех заинтересованных сторон, включая лидера и команды Центра управления полетами, чтобы помочь наилучшим образом решать неизбежные проблемы и споры, возникающие в режиме реального времени и угрожающие целостности экипажа, а также организовывать совместную работу на справедливой основе.

В многонациональных миссиях одной из наиболее важных задач является гарантия совместимости для выполнения общей эффективной работы. Члены экипажа могут считаться совместимыми, если каждый из них демонстрирует качества и поведение, которые другие члены экипажа считают желательными и целесообразными. Иногда это является непростой задачей, так как члены команды могут иметь разное образование, специальность и квалификацию. Например, ученые часто предпочитают работать автономно, не склонны к взаимодействию и не любят работать в иерархической командной структуре. Летчики-космонавты, напротив, часто имеют военное прошлое, что заставляет их предпочитать более упорядоченную командную структуру. Оценка совместимости может основываться на результатах предполетных психологических тестов и личностных опросников. Еще один популярный подход включает в себя набор различных поведенческих упражнений (ролевых игр, групповых обсуждений и упражнений).

Цель их состоит в том, чтобы отобрать людей, демонстрирующих способности для эффективной командной работы и совместного решения текущих проблем.

Богатый опыт оценки межличностной совместимости для продолжительного космического полета был накоплен при реализации советской и российской космической программы. При этом использовались методики оценки межличностных отношений, психофизиологические тесты и специальные групповые упражнения. Некоторые результаты этих исследований оказались неожиданными. Например, российские психологи обратили внимание на то, что при выборе конкретных космонавтов для экипажа полезной может быть информация о степени синхронизации биоритмов. Например, важные данные можно получить при мониторинге пульса в процессе совместного решения сложной задачи. Замечено, что как только члены экипажа начинают помогать друг другу, их пульс синхронизируется. Хотя некоторые специалисты подвергают такую точку зрения сомнению, в целом считается, что чем выше синхронизация биоритмов, тем выше совместимость.

Важным является вопрос об оптимальном численном составе экипажа. С одной стороны, что чем больше группа, тем больше шансов на возникновение межличностного конфликта. С другой стороны, установлено, что большая группа лучше реагирует на изоляцию. Раздражение в такой группе обычно направлено не на других ее членов, а на предметы или неличностные аспекты ситуации. Очевидно, что для космических полетов, особенно межпланетных, решение по предельной численности экипажа будет приниматься исходя из технических соображений расчета общего веса в пересчете на массу системы жизнеобеспечения одного человека. Одно эмпирическое соображение состоит в том, что размер экипажа и степень неоднородности его членов должны быть как можно меньшими, так как сложность межличностного взаимодействия увеличивается с ростом численности экипажа. С другой стороны,

увеличение численности экипажа увеличивает количество возможных социальных отношений, социальную стимуляцию и вероятность развития дружеских отношений, которые являются благоприятными факторами для групповой сплоченности. В любом случае рекомендуется нечетное количество членов экипажа, чтобы предотвратить возникновение двух равных «группировок», которые могли бы помешать демократическому решению возникающих проблем.

Большое внимание уделяется также профессиональному составу команды. Традиционно все экипажи пилотируемых космических экспедиций включали одного или более летчиков-космонавтов. Однако, в настоящее время с учетом прогресса беспилотной космонавтики необходимость включения в экипаж летчика-космонавта вызывает сомнения. Некоторые специалисты считают, что было бы достаточным наличие в экипаже минимально обученного ученого, способного отключить автоматическую систему в случае неисправности. Считается необходимым иметь на борту врача, способного справиться с медицинскими проблемами во время полета. Вопросы, на которые пока не найдено однозначных ответов, касаются обязательного включения в состав экипажа механика по ремонту неисправных систем, количества ученых для первопроходческой исследовательской миссии и др. Одно положение является неоспоримым: командиром должен быть наиболее квалифицированный член экипажа, будь то пилот, инженер или ученый. Главное – стиль руководства командира должен поощрять групповое взаимодействие, работоспособность и моральный дух экипажа. Следовательно, в настоящее время роль командира не присваивается автоматически летчику-космонавту, как это было на ранних этапах развития пилотируемой космонавтики.

Известно множество факторов, способствующих групповой сплоченности и производительности работ. Например, во время

длительных полетов на борту «Мир» члены экипажа сообщили, что недельный визит на станцию международной команды способствовал снятию напряженности между космонавтами. Космонавты получили письма и подарки из дома, а также специальные продукты и свежее молоко. Удивили их и маленькие, но, видимо, радующие глаз игрушки, музыкальные диски и пр. Неожиданность таких подарков, несомненно, играет положительную роль в улучшении настроения и уменьшении стресса. Вечеринки и групповые ритуалы также помогают поддерживать моральное и групповое взаимодействие.

7.3. Психологические тренировки и психологическая поддержка в космическом полете

После того, как экипаж предстоящего космического полета отобран, все-таки сохраняется опасность, связанная с непредсказуемостью последствий реального стресса космического полета в отношении поведения космонавтов, что может привести к ухудшению группового взаимодействия. Во избежание подобных ситуаций проводится предполетное психологическое обучение для подготовки экипажа к адекватному реагированию на проблемные ситуации в космосе. Если все же в полете возникают конфликты, в игру вступает психологическая поддержка с Земли.

Тренировки группового взаимодействия и совместного решения проблем проводятся на Земле до начала миссии. Космонавты должны быть не только технически компетентными в своей области; они также должны быть осведомлены о межличностной динамике и межкультурных различиях. И экипаж, и персонал наземного управления проходят совместную подготовку перед полетом для освоения техники взаимодействия между собой. Оптимально, когда экипаж специально отобран для определенной миссии, после

чего обучение, ориентированное на этот конкретный экипаж, должно быть сосредоточено на следующих вопросах: а) поддержка процесса формирования команды (создание стабильного состава экипажа, выработка единых норм поведения, определение общих целей миссии); б) «упреждающее решение проблем» (информирование членов экипажа о том, как поступать с конкретными психологическими проблемами, которые чаще всего возникают в ходе полета).

Выделяют три этапа такого обучения: а) этап освоения, во время которой экипаж изучает основы групповой динамики и межличностных отношений и их влияние на производительность работы; б) этап практического закрепления результатов обучения, когда группа демонстрирует знания об изученных концепциях, применяя их на практике в ходе ролевых и имитационных упражнений; в) этап повторения, препятствующий забыванию и утрате приобретенных навыков. Эксперты по групповой динамике, которые пользуются доверием экипажа, помогают космонавтам и в предполетный период, и во время миссии, если возникнет такая необходимость.

Программа полета и график ее выполнения желательно планировать таким образом, чтобы свести к минимуму возможные социальные и психологические проблемы, а также обеспечить максимальную индивидуальную и групповую производительность труда. С экипажем также тщательно согласуются многие вопросы, касающиеся среды обитания на космической станции, ее дизайна и функциональности, включая одежду, продукты питания, планировку, декор, утилизацию отходов, личную гигиену, личное пространство, дизайн инструментов и оборудования, а также компьютеры и программное обеспечение.

Психологическая подготовка имеет первостепенное значение для российских экипажей. С момента своего отбора космонавты участвуют в серии психологических тренингов, направленных на

предотвращение возникновения проблем адаптации к космическому полету. Космонавты проходят испытания не только на симуляторах, но и в реальных стрессовых ситуациях, таких как прыжки с парашютом и удаленные миссии выживания. Эти миссии запланированы так, что они максимально реалистичны и опасны. Российские космонавты считают, что этот тип тренировки развивает уверенность в себе, дисциплину и уравновешенность во время непредвиденной чрезвычайной ситуации. Тренировки в стрессовой ситуации также предназначены для того, чтобы экипаж работал совместно как гармоничная, хорошо скоординированная команда.

Советская и российская космонавтика могут гордиться мощным психологическим обеспечением полетов. Необычайно высокий уровень психологической поддержки, которую получают космонавты от начала наземных тренировок до конца миссии, несомненно, является фактором успеха, в особенности, при полетах большой продолжительности. В противоположность этому, психологическая поддержка американских астронавтов была минимальной, пока они не столкнулись с реальными психологическими проблемами во время реализации программы «Мир»-NASA. После этого, в 1994 г. в NASA была организована группа психологического сервиса из психологов и бихевиористов, разработавших программу психосоциальной поддержки астронавтов на основе российских аналогов.

Мониторинг уровня тревожности и идентификация возможной психологической симптоматики у космонавтов проводится с начала наземных тренировок и до окончания полета. Используются батареи психологических тестов, психиатрические опросы, проводится тщательная проверка совместимости. Тестирование и мониторинг проводятся группой психологической поддержки, специализированным медицинским персоналом, военным и гражданским космическим персоналом. Для поддержки этих усилий используются приемы биологической обратной связи, самовнуше-

ние и различные стратегии релаксации, а при наличии показаний назначаются препараты для регуляции поведения. Во время полета ведется постоянный мониторинг голоса космонавтов с последующим психологическим анализом в Центре управления полетами для оценки степени напряжения экипажа, сплоченности и морального духа, выявления потенциальных межличностных проблем. Анализ голосовых паттернов космонавтов сначала проводится в предполетный период на Земле во время стрессовой и нестрессовой деятельности. Эти данные сравниваются с голосовыми паттернами, записанными на космической станции, чтобы проверить уровень стресса. Для интерпретации выражений лица и «языка тела» используется видеонаблюдение.

Для улучшения психологического статуса космонавтов, им регулярно отправляют личные вещи, различные рекреационные материалы с помощью капсул пополнения запасов «Прогресс». Они также имеют возможность быть в курсе событий, происходящих на Земле через новости, книги, аудио и видео материалы, часто общаются по линиям связи с семьей и друзьями в частном порядке, с известными учеными, актерами, интересными людьми.

Психологическая поддержка космонавтов не заканчивается с полетом. На Земле психологи помогают им приспособиться к новому социальному статусу человека, побывавшего в космосе, и reintegrироваться со своими семьями после столь долгого отсутствия.

Глава 8. ЦИРКАДИАННЫЕ РИТМЫ, СОН И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

Циркадианная система и система регуляции сна – две физиологические системы, которые в процессе динамического взаимодействия регулируют суточный ритм сна/бодрствования и работоспособности. Центральный компонент циркадианной системы представлен эндогенными биологическими часами, расположенными в супрахиазматическом ядре гипоталамуса. Это парное ядро содержит нейронную сеть, включающую около 20 тыс. нейронов, и образующую циркадианный осциллятор. Этот осциллятор способен генерировать и задавать многочисленные физиологические, биохимические и поведенческие циркадианные (околосуточные, с периодом около 24 часов) ритмы в органах и тканях организма (рис. 8.1.).

Одним из наиболее важных поведенческих циркадианных ритмов является суточный ритм сна/бодрствования. Он проявляется в стойком 24-часовом цикле бодрствования, ночного сна и соответствующих изменений производительности. График этого ритма можно изобразить в виде синусоиды (точнее, кривой косинор-функции) с периодом в 24 часа, средней по популяции акрофазой в точке, соответствующей приблизительно 16:00 часам и батифазой в точке, соответствующей приблизительно 04:00 часам местного времени. Наиболее часто используемыми показателями физиологических и биохимических циркадианных ритмов являются изменения температуры тела и концентрации мелатонина.

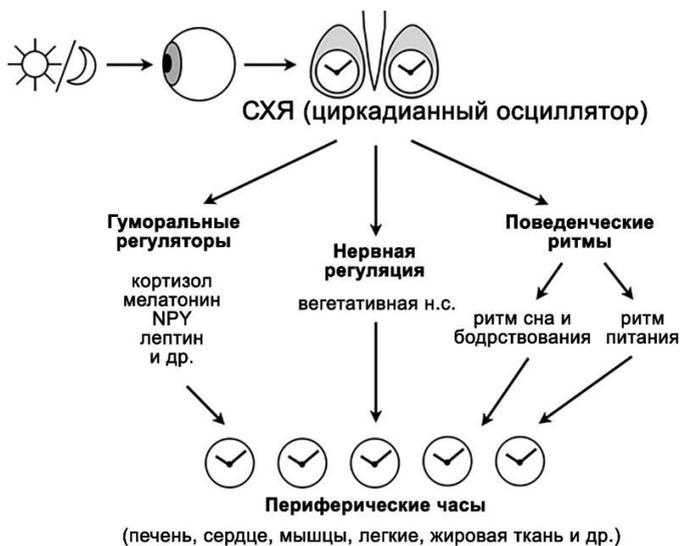


Рис. 8.1. Схема циркадианной системы млекопитающих

Главный циркадианный осциллятор супрахиазматического ядра (СХЯ) синхронизируется внешним циклом день/ночь через фоторецепторы сетчатки. СХЯ координирует ритмы периферических часов (с помощью нейро-гуморальных механизмов) и регулирует поведенческие ритмы (по [18], с изменениями).

Система регуляции сна управляет выраженностью текущего стремления ко сну, обычно рассматриваемого в виде совокупности гомеостатического процесса экспоненциальной формы и фазы циркадианного ритма, определяющих время наступления и продолжительность суточного сна и бодрствования. Стремление ко сну находится на самом низком уровне в момент утреннего пробуждения, после чего в течение дня стремление ко сну постепенно усиливается. Как только наступает сон, стремление ко сну постепенно снижается вплоть до пробуждения. Наилучшим образом взаимодействие гомеостатического и циркадианного драйва в ре-

гуляции сна описывает модель двух процессов (рис. 8.2). Сон вызывается высоким уровнем гомеостатического драйва ко сну и низким циркадианным драйвом к бодрствованию (по: [19])

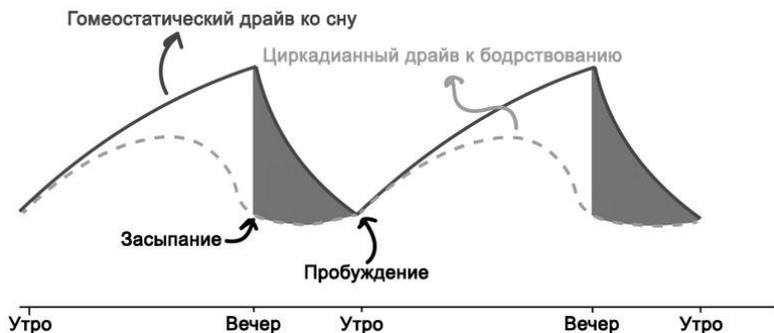


Рис. 8.2. Модель двух процессов регуляции сна

Циклы сна/бодрствования человека в настоящее время регистрируют с использованием мониторинга двигательной активности (актиграфии), регистрируемой при помощи миниатюрного акселерометра, передающего сигнал к микропроцессору. Эти детали интегрированы с наручными часами.

Период активности циркадианного осциллятора супрахиазматического ядра не равен в точности 24 часам. В условиях изоляции он в среднем составляет 24,2 часа, и его величина колеблется от 18 до 28 часов у отдельных индивидуумов [20]. Активность циркадианного осциллятора синхронизируется с 24-часовым суточным циклом среды с помощью совокупности факторов, которые носят название времяздателей (zeitgebers), главным среди которых является суточное изменение естественной освещенности. Информация об освещенности воспринимается специфическими фоточувствительными ганглиозными клетками сетчатки глаза и затем передается через ретино-гипоталамический тракт в супрахиазма-

тическое ядро гипоталамуса. Через этот нервный тракт свет действует как мощный синхронизирующий стимул, регулирующий циркадианные ритмы и способствующий стабильному фазовому соотношению между циркадианными ритмами и циклом сна/бодрствования. Световое воздействие также может вызвать смещение фазы циркадианных ритмов в сторону опережения или запаздывания. Влияние светового воздействия на циркадианные ритмы зависит от продолжительности, интенсивности и длины световой волны, а также фазы циркадианных ритмов, в которую свет воспринимается глазом. Специальные исследования показали, что длина световой волны, оказывающая наиболее выраженное влияние на циркадианный осциллятор супрахиазматического ядра, соответствует максимальной чувствительности ганглиозных клеток сетчатки и равняется 484 нм (синяя часть спектра).

8.1. Циркадианные ритмы в космосе

Выполнение программы полета часто требует от космонавтов сменного графика работы и нарушения регулярности циклов сна/бодрствования. Это может привести к нарушению нормального соотношения между фазой ритма циркадианного осциллятора и фазой цикла сон/бодрствование, вследствие чего в свою очередь нарушаются циркадианные ритмы. Иначе говоря, происходит диссоциация между эндогенными физиологическими циркадианными ритмами и производственным суточным ритмом работы. Как было многократно продемонстрировано в наземных исследованиях, последствиями такой диссоциации ритмов могут быть нарушения ночного сна, недомогание, ошибки в работе, появление периодов неконтролируемого сна в часы бодрствования, плохое настроение, снижение социального взаимодействия, проблемы в общении и несчастные случаи. Часто наблюдается снижение производитель-

ности труда, являющееся следствием фазового смещения периода выполнения работы в неблагоприятную фазу циркадианного ритма сна/бодрствования.

Первая попытка оценки циркадианных ритмов человека в условиях космического полета была предпринята в 1967 г. в ходе реализации американской программы «Gemini». Существенных нарушений циркадианных ритмов при этом выявлено не было, однако такие нарушения были впоследствии обнаружены в ходе космических экспериментов на животных. В частности, в экспериментах на макаках и крысах в условиях космического полета были выявлены значительные изменения периода и амплитуды свободнотекущих циркадианных ритмов, фазовые сдвиги и нарушения фазовых соотношений.

Получение экспериментальных данных о циркадианных ритмах человека требует длительного времени и многочисленных повторных измерений. На космическом корабле такое исследование особенно затруднительно вследствие измененного посменного графика работы и отдыха, приема некоторых лекарств, режима упражнений и воздействия света изменчивой интенсивности. Поэтому впервые систематический комплексный сбор данных о циркадианных ритмах, сне и производительности у человека был начат лишь в 1988-1989 г.г. на станции «Мир» и завершен лишь в 1996 г. во время миссии «STS-78 Spacelab». Было установлено, что циркадианный ритм температуры тела характеризуется примерно тем же периодом и фазой, что и на Земле, но слегка сниженной амплитудой. По всей видимости, в космосе он не был свободнотекущим и продолжал синхронизироваться времязадателями. Форма графика температурного ритма изменилась, напоминая пилообразную кривую, чего не наблюдается в земных условиях (в условиях постельного режима с наклоном головы вниз). Был сделан вывод о том, что в ходе данного исследования циркадианная система была устойчива к воздействию факторов космического полета, несмотря

на укорочение цикла сон/бодрствование до 23,6-часов. Утреннее пробуждение являлось мощным сигналом и времязадателем для циркадианных ритмов членов команды. Хотя в данном исследовании было обнаружено, что циркадианные ритмы в космосе аналогичны по фазе и амплитуде тем, что наблюдаются на Земле, и соответствующим образом согласуются с графиком работы и отдыха, научные данные, собранные в ходе других космических полетов, выявили наличие нарушений циркадианных ритмов. Например, в одной из последующих публикаций [21] описана 2–3 часовая фазовая задержка ритма температуры тела и бодрствования без изменения его амплитуды за время 8-суточного полета. Однако из-за малой продолжительности полета не удалось определить, представляет ли собой фазовая задержка циркадианный фазовый сдвиг или отражает переключение ритма на свободнобегущую периодичность. В ходе последующего полета на космической станции «Мир», трое из четырех космонавтов продемонстрировали фазовый сдвиг циркадианного ритма температуры тела на 2 часа со снижением его амплитуды по сравнению с исходными данными, собранными на Земле. По мнению исследователей, этот фазовый сдвиг был связан с более поздним временем отхода ко сну и снижением синхронизирующего влияния времязадателей. В более поздних исследованиях было показано, что ухудшение настроения и работоспособности экипажа в полете может объясняться прогрессирующим снижением амплитуды циркадианного ритма температуры тела и фазовой задержкой ритма кортизола относительно начала сна. Этим нарушениям мог также способствовать укороченный (менее 24-часов) суточный график отдыха и активности и циклы воздействия света/темноты, недостаточные для оптимальной циркадианной синхронизации осциллятора. Нередко на космической станции вместо обычного 24-часового режима суток, при котором зачастую возникает бессонница в начальный период отхода ко сну, планируется 22,5-часовой день с несколькими эпизодами сна.

В отдельных случаях было задокументировано влияние долгосрочного космического полета на циркадианные ритмы. Например, выполнен мониторинг циркадианного ритма температуры тела и активности у одного космонавта во время 122-суточной миссии на станции «Мир». В заключительные 12 дней полета зарегистрированы нарушения сна на фоне сниженной амплитуды температурного ритма. В другом длительном полете параметры циркадианных ритмов стабилизировались к 120-м суткам миссии и оставались стабильными на протяжении оставшейся части полета. Однако в другом исследовании установлено, что у одного космонавта во время 438-суточного полета на станции «Мир» фаза суточного ритма температуры тела запаздывала по сравнению с исходной на 2,52 часа в первые 30 дней миссии, на 3,25 часа на 183–215 дни миссии и на 1,34 часа на 395–425 дни миссии, но эти фазовые сдвиги были приписаны к изменениям силы и структуры времязадателей на станции.

Существуют индивидуальные особенности, которые могут влиять на производительность членов экипажа в космической среде. Некоторые люди более восприимчивы к потере сна или к изнурительному влиянию сменных циклов работы/отдыха. Эти особенности могут зависеть от индивидуальных циркадианных хронотипов. Есть также указания на определенные гендерные различия в отношении когнитивной производительности и психомоторных показателей. Предполетные тренировки с имитацией микрогравитации (постельный режим) улучшают адаптацию к космической среде.

Способность успешно адаптироваться к измененным графикам сна/бодрствования может зависеть от индивидуального циркадианного хронотипа. Отдельными исследователями такие индивидуальные показатели циркадианных ритмов как утренний или вечерний хронотип, амплитуда и стабильность ритмов оцениваются как предикторы адаптивности к циркадианным фазовым сдви-

гам. Существует континуум индивидуальных поведенческих и физиологических циркадианных ритмов человека, варьирующих от утренних к вечерним хронотипам в условиях действия времязадателей. Эти индивидуальные различия в характеристиках циркадианных ритмов предполагают, что могут иметь место существенные различия в способности данного члена космического экипажа поддерживать адекватный сон и физиологически адаптироваться к сменному режиму работы/отдыха и укороченному циклу сна/бодрствования на станции. Влияние факторов космической среды на работоспособность членов экипажа, вероятно, также будет различаться в зависимости от индивидуальных физиологических показателей, характеристики циркадианных ритмов, предшествующего опыта космических полетов и пола. Попытки в наземных условиях определить степень зависимости индивидуальной производительности в условиях последующего длительного полета от индивидуальной истории сна/бодрствования, нейроповеденческой чувствительности или адаптации к тестовым воздействиям показали, что различия в производительности не связаны с историей сна/бодрствования или предыдущим воздействием, но скорее являются индивидуальной характеристикой личности. Предварительное знание изменений индивидуальной производительности в условиях депривации сна может обеспечить прогностическую достоверность оценки возможностей данного члена экипажа в плане адаптации к измененному графику работы/отдыха во время космического полета.

Одним из внешних факторов, воздействующих на организм в космическом полете, является измененный режим освещения. Одной из причин непрерывно изменяющегося уровня освещения является отсутствие в полете привычного 24-часового цикла день/ночь, вместо этого при орбитальном полете продолжительность оборота корабля вокруг Земли приблизительно составляет 90 минут. Уровень искусственной освещенности на борту также

непостоянен. Это, в частности, обусловлено значительными различиями освещенности в разных отсеках корабля. Измерения на борту Шаттла показали, что уровень освещенности в рабочих отсеках в часы наибольшей активности может снижаться до 10 лк, а в кабине экипажа может повышаться до 80 000 лк. Таким образом, сильно изменяющаяся интенсивность освещения снижает физиологическую роль света в качестве фактора синхронизации циркадианного осциллятора супрахиазматического ядра и приводит к нарушениям циркадианных ритмов. В советской космонавтике рекомендовалось обеспечение освещенности в 400–500 лк полного светового спектра для работы на космических кораблях и было зарегистрировано улучшение производительности труда космонавтов станции «Салют-7» при переходе на максимальное освещение. В настоящее время интенсивное световое воздействие широко используется в предполетный период для облегчения адаптации циркадианной системы к предстоящему полету. Например, в ходе подготовки к американской миссии «STS-35», предусматривающей ночной старт корабля и работу в ночное время, астронавтов подвергали воздействию яркого освещения в соответствии с проецированным началом предстоящего периода бодрствования. Субъективные отчеты астронавтов показали, что после использования яркого света удалось получить улучшение качества сна в течение дня и сохранение бдительности ночью для облегчения адаптации к расписанию полета еще до даты запуска. В ходе другого эксперимента оценивали эффект 7-суточного протокола, сочетающего воздействие яркого света с фазовым сдвигом сна при 12-часовом запаздывающим сдвиге суточного режима у восьми астронавтов перед запуском. К 4-6 дню такого 7-суточного протокола у семи из восьми членов экипажа были обнаружены фазовые задержки суточного ритма мелатонина и кортизола, приходившиеся на первые 2 часа ожидаемой 11-12 часовой смены.

В аспекте планируемого пилотируемого полета на Марс должно быть изучено влияние марсианского цикла день/ночь на функции человеческого организма и возможности его адаптации к этому циклу. С этой целью выполняются наземные исследования способности циркадианного пейсмекера человека синхронизироваться с периодом, отличным от 24-часового суточного периода Земли. В этих исследованиях также оценивается потенциальная польза светового воздействия с целью облегчения синхронизации биологических часов. Марсианские сутки (также известные как сол) делятся примерно на 39 минут больше земных суток (1 сол равен 24,6 часа). Хотя продолжительность этого периода не сильно отличается от земной и находится в пределах диапазона индивидуальных значений свободнобегущего циркадианного ритма, результаты специальных исследований показали, что при тусклом свете, например, в помещении, многие люди не могут надежно синхронизировать свои биологические часы с марсианскими 24,6-часовыми сутками. Наибольшие проблемы ожидаются у приблизительно 25% людей, имеющих период собственного циркадианного осциллятора менее 24 часов. В настоящее время разрабатываются меры по обеспечению адаптации к продолжительности марсианских суток. Они, в частности, включают выбор режимов и спектра светового воздействия, обеспечивающего положительное влияние на регуляцию циркадиантных ритмов и секрецию мелатонина. Исследуемая длина световых волн включает диапазон более 600 нм (присутствующий в атмосфере Марса) и менее 440 нм (присутствующий в спектре освещения МКС), поскольку со светом в данных диапазонах космонавты, по всей видимости, столкнутся во время миссии. Результаты этих исследований помогут разработать эффективные световые инструменты, способные помочь членам экипажа поддерживать стабильные циркадиантные ритмы, а службам подготовки полета определить необходимые параметры освещения на космическом корабле.

Нарушения циркадианных ритмов и производительности могут также быть следствием измененного режима труда и отдыха в космосе. Если рабочее время запланировано на период, на несколько часов предшествующий или следующий за максимальным циркадианным уровнем производительности, что сопровождается значительными фазовыми сдвигами ритма сна/бодрствования, может произойти значительное снижение производительности. Как показали американские миссии «Gemini» и «Apollo», график сна, составленный в «шахматном порядке», когда один член экипажа спит, пока другой член экипажа работает, может привести к сдвигам времени сна и циркадианных ритмов, что является одной из главных причин нарушений сна в космосе. Необходимость в круглосуточной работе часто требует деления экипажа на две смены, при этом половина экипажа вынуждена перестраиваться на обращенный по времени цикл сна/бодрствования. Резкие одномоментные сдвиги режима сна/бодрствования вплоть до 12 часов (т. наз. «slam shifting») использовались для согласования графиков команды космического корабля «Shuttle» и экипажа МКС при стыковке. Попытки сдвигов ритма сна/бодрствования при 8-суточном полете оказались безуспешными, поскольку экипаж как правило сохранял наземные ритмы работы и отдыха и изменение графика лишь приводило к повышенной утомляемости и раздражительности. В течение длительного полета, продолжавшегося более года, приходилось 14 раз сдвигать ритм сна/бодрствования на 4,5-5,0 часов для стыковок, что вызвало у экипажа астению и утомляемость к концу дня, а также нарушения сна. В некоторых полетах («Салют-4», «Салют-6», «Союз», «Shuttle STS-90 и STS-95») использовался сокращенный суточный график работы и отдыха длительностью 23,3–23,6 часа. Космонавт В.И. Севастьянов назвал такой режим настоящим «бичом» во время полета на «Салюте-6». Наблюдалось ухудшение производительности и сна, связанное со сдвинутыми графиками сна/бодрствования и 23,5-часовыми цик-

лами работы и отдыха. Текущие правила планирования полетов позволяют в случае необходимости удлинять график работы не более, чем на 2 часа и укорачивать не более, чем на 30 минут в течение конкретных суток. Например, если намечена стыковка с МКС в то время, когда экипаж МКС должен по расписанию спать, ситуация требует от экипажа МКС заблаговременного постепенного перехода на новый график в предыдущие дни, чтобы в нужный момент бодрствовать и быть готовыми к стыковке. Этот постепенный переход достигается плавным прогрессирующим фазовым сдвигом режима либо в сторону опережения, либо в сторону запаздывания. Хотя такие плавные сдвиги в расписании позволяют экипажу адаптироваться к новому графику, изменения расписания могут происходить неоднократно в течение последовательных дней, что усугубляет нарушение циркадианного ритма. Наземные исследования влияния повторных фазовых сдвигов режима на циркадианнные ритмы, сон, физиологические функции, уровень тревожности, когнитивные функции, работоспособность и настроение показали, что более физиологичным является сдвиг в сторону запаздывания, чем в сторону опережения.

При подготовке будущего полета на Марс учитывается, что не только циркадианная система космонавтов должна будет адаптироваться к марсианскому солу, аналогичные требования будут предъявляться к работникам наземных служб в Центре управления полетом. Эти требования выполнялись при операционном управлении марсоходом Mars Exploration Rover (MER), когда персонал работал в соответствии с 24,6-часовым графиком, когда работники ежедневных смен отчитывались и отправлялись отдыхать примерно на 39 минут позже каждый день, продолжая находиться в условиях 24-часовых суточных циклов Земли. Хотя на группе волонтеров из числа персонала, принимавшего участие в этом проекте, выполнены исследования графиков сна/бодрствования, уровня бодрствования, адаптации в течение 90 дней работы с марсоходом,

подготовка пилотируемой миссии на Марс требует дальнейших исследований.

8.2. Особенности сна в условиях космического полета

Согласно существующим правилам, рекомендуемая продолжительность сна космонавтов составляет 8 часов в сутки (минимум – 6 часов), однако, во время большинства космических полетов происходила значительная потеря продолжительности, и имели место нарушения сна. Документально подтверждено, что реальная продолжительность ночного сна космонавтов на орбите составляет около 6 часов, а в некоторых случаях она укорачивается до 4 часов и менее. Это подтверждено многочисленными исследованиями с использованием полисомнографических измерений, актиграфии и субъективных отчетов.

Первый задокументированный сон в космосе состоялся в 1961 г. и принадлежал советскому космонавту Герману Титову («Восток-2»). Первая попытка сна в течение четырех ночей подряд имела место на «Востоке-5» в 1963 г. Гордон Купер был первым астронавтом, пытавшимся дремать и спать в открытом космосе (миссия «Mercury»). Миссия «Gemini VII» стала первым случаем мониторинга электроэнцефалограммы (ЭЭГ), записи (55 часов) во время сна в космосе. Астронавты миссии «Apollo» сообщали, что сон в начале полета был прерывистым и трудным в первую ночь, но нормализовался через 3-4 дня. Зарегистрировано несколько случаев бессонницы в первую ночь космического полета, и нередко встречаются проблемы со сном в начале миссий.

В связи с требованиями текущей ситуации циклы сна/бодрствования могут становиться как длиннее, так и короче 24 часов, в результате чего возникает несоответствие между фазой циркадианного осциллятора и фазой цикла сна/бодрствования. В целом

уменьшение времени сна, происходящее при укорочении цикла сна/бодрствования может быть результатом смещения запланированного времени сна на период, когда циркадианный осциллятор программирует бодрствование. Бессонница у членов экипажа также может возникать из-за сна в неблагоприятную циркадианную фазу. Например, цикл сна/бодрствования продолжительностью более 24 часов может иметь место, когда стыковка должна состояться через 3 часа после запланированного отхода ко сну, что вынуждает космонавтов удлинить их рабочий день. Это увеличенное время бодрствования может приводить к недосыпанию и усталости.

Хотя в ранних полетах сокращение общего времени сна могло быть следствием оперативных ограничений (например, малой длительности миссии, неудобной среды для сна), многочисленные жалобы на проблемы со сном по-прежнему поступают и от участников недавних космических миссий. Отчеты, собранные во время разбора полетов 58 астронавтов, показали, что ежедневный сон в космосе длился 6,03 часа по сравнению с 7,9 часами сна у тех же космонавтов на Земле. Выяснилось, что нарушение сна является распространенным явлением, особенно в первый (продолжительность 5,7 часа) и последний (продолжительность 5,6 часа) дни миссии. В другие дни продолжительность сна сокращалась на 1,7 часа во время полета по сравнению с 7,9 часами сна в предполетном периоде. Многие члены экипажа в отдельных случаях спали менее 5 часов, а иногда всего 2 часа или меньше.

В другом исследовании регистрировали сон у пяти космонавтов и астронавтов программы «Мир»/NASA во время предполетной подготовки (26 ночей), полета (24 ночи) и послеполетного периода (14 ночей). Обнаружено сокращение времени сна в полете на 27%. Укорочение сна было научно задокументировано и в более поздних полетах по программе «Shuttle»: время сна уменьшилось с 6,5 часов в предполетный период до 6,1 часа во время полета (миссия STS-78). У астронавтов миссий STS-85 и STS-90, средняя про-

должительность сна сократилась с 7,0 до 6,6 часа. Сделан вывод о том, что укорочение сна в космическом полете является не случайным, а постоянно встречающимся явлением при продолжительности миссии около 2 недель. В ходе советских космических полетов также задокументировано множество случаев сокращения длительности сна.

Первое полисомнографическое исследование сна было выполнено в ходе полета станции «Мир» в 1988-1989 гг., а первое исследование сна в сочетании с циркадианными ритмами и производительностью в космосе было выполнено в ходе миссии STS-78. Полисомнографические исследования сна в космосе показали нарушение структуры сна, в том числе значительное уменьшение сна с быстрыми движениями глаз (REM-сон), уменьшение латентного периода REM-сна, общее уменьшение медленного сна, перераспределение медленного сна от первого ко второму циклу сна, увеличение движений во сне, снижение эффективности сна (с 89% в предполетный период до 63% в полете) и уменьшение субъективного качества сна. Наблюдавшееся снижение дельта-активности во время медленного сна вызывает беспокойство, так как дельта-сон считается самой глубокой и восстанавливающей фазой сна. Изменения в структуре сна также были зарегистрированы в других полетах на станции «Мир». Эти данные предполагают, что в дополнение к общему сокращению времени сна, происходит нарушение процесса S – восстановительного компонента сна. Такие хронические сокращения общего времени сна и восстановительного компонента сна в космическом полете вызывают опасения по поводу кумулятивного отрицательного эффекта на функции нервной системы, поведение, работоспособность и физиологическую активность, поскольку достижение адекватного уровня сна является единственным очевидным способом поддерживать максимальную бдительность и уровень производительности.

Еще одним свидетельством недосыпания и нарушения сна во время космического полета является прием снотворных препаратов. Статистические данные, полученные на основании 79 полетов, показали, что 45% из 219 астронавтов принимали снотворные медикаменты для борьбы с нарушениями сна. Ранее, в 1994 г. были получены похожие результаты, согласно которым более 30% астронавтов обращались за снотворным во время полета. Было также установлено, что в 50% случаев снотворное используется в двухсменных миссиях и лишь в 19,4% случаев – в односменных миссиях. В любом случае, эти цифры более чем в три раза превышают процент американцев, принимающих снотворные, что указывает на серьезные проблемы со сном в космическом полете. Работа в две смены, для которой от половины экипажа требовался инвертированный режим работы, приводила к инвертированию цикла сна/бодрствования, в результате чего число астронавтов, прибегавших к снотворным, оказалось в 2,5 раза более высоким, чем в односменных миссиях. Бензодиазепины, применявшиеся в качестве снотворных, являются эффективными препаратами, однако, им присущи неблагоприятные побочные эффекты, включающие седативный эффект, ухудшение работоспособности, антероградную амнезию и изменения в активности ЭЭГ в период сна. Как альтернатива, были попытки использования в качестве снотворного мелатонина. При наземном моделировании космического полета мелатонин оказывал ожидаемое снотворное действие без существенных побочных эффектов, однако прием мелатонина во время миссии STS-90 «Neurolab» не подтвердил снотворного действия этого препарата.

В тех случаях, когда операционные требования не позволяют предоставить космонавтам возможности непрерывного 8-часового ночного сна, альтернативой приему снотворных является дополнительный дневной сон. В этом плане до сих пор проводятся наземные исследования с целью определить оптимальные подходы

к планированию такого режима сна, чтобы получить общую его суточную продолжительность, обеспечивающую максимальный уровень нейрорповеденческого функционирования. Главным является вопрос о том, является ли определенное количество ночного и дневного сна достаточной контрмерой для предотвращения снижения производительности и бдительности. Предварительные результаты показывают, что ночной сон в сочетании с дневным сном улучшает нейрорповеденческое функционирование; тем не менее, влияние частичного ограничения ночного сна по-прежнему сказывается на производительности. Полученные данные также показывают, что на производительность влияет не только продолжительность дневного сна, но и положение дневного сна в циркадианном цикле, а также соотношение между началом дневного сна и началом периода ограничения ночного сна. В целом накопленные результаты свидетельствуют о том, что дополнительный дневной сон может помочь сохранить требуемый уровень когнитивных функций и работоспособности в условиях хронического ограничения сна в космосе.

Исследование качества и количества сна было продолжено в наблюдениях на 16 членах экипажа миссий «Shuttle» и «Союз». Исследование было посвящено характеристике нарушений сна и циркадианных ритмов в краткосрочных и долгосрочных полетах с помощью актиграфии. Одновременно проводился мониторинг освещенности, чтобы дополнительно задокументировать степень различий в освещении среди космонавтов и его влияния на циркадианные ритмы и сон. Данные собирали не только в полете, но и в предполетный период, и в период послеполетного восстановления. Собранные данные используются для помощи в разработке мер по предотвращению нарушений сна и связанного с ними снижения работоспособности и внимания во время космических полетов.

Циркадианный ритм является основным фактором изменений производительности и эффективности работы космонавтов, так что

эти показатели сильно зависят от фазы циркадианного осциллятора. В ходе наземной симуляции выполнения задач космического полета, при решении сложной когнитивной задачи (преобразование цифровых символов в слова) испытуемые продемонстрировали самую низкую эффективность в ночные часы – с полуночи до 07:00–08:00 утра. Таким образом, эффективность работы в ночное время во время пилотируемых космических полетов, может резко снижаться. В связи с этим изменчивость производительности из-за нарушений циркадианнных ритмов во время длительных космических миссий, когда биологические часы разных астронавтов не будут синхронизированы друг с другом и потенциально могут работать в свободнобегущем режиме с разными эндогенными периодами, вызывает беспокойство. В результате, уровень бдительности и работоспособности может нарушаться, несмотря на волевые попытки сохранить нейроповеденческие функции в неблагоприятной циркадианной фазе. Это может привести к проблемам с засыпанием в циркадианный период, в который тело запрограммировано на бодрствование, что приводит к нарушениям качества и количества сна. В настоящее время усилия хронобиологов направлены на разработку мер профилактики и купирования нарушений циркадианного ритма у космонавтов.

В условиях космического полета члены экипажа должны быть в состоянии постоянно поддерживать высокий уровень бдительности и производительности для работы со сложной техникой, а также для принятия адекватных операционных решений. Любая потеря бдительности или снижение максимального уровня производительности может иметь катастрофические последствия. Проблема в том, что большинство людей часто не осознают своей растущей усталости и возникновение сопутствующего дефицита производительности. Трудности в идентификации усталости или сонливости связаны с отсутствием общедоступных физиологических и биохимических маркеров этих состояний. Хотя современ-

ные технологии мониторинга имеют потенциал в плане обнаружения утомления, их реализуемость в космической среде пока не доказана. В научной литературе описана связь снижения производительности и появления усталости у космонавтов с нарушениями сна, изменениями графика работы и отдыха, тяжелой нагрузкой. Выбор интенсивности нагрузки с учетом пожеланий космонавтов, выходные дни, соблюдение стабильного 24-часового распорядка сна/бодрствования, создание психологического комфорта при реализации советской космической программы привело к росту производительности экипажа, уменьшению количества ошибок и улучшению показателей рабочей нагрузки. Однако, в последующем были получены данные о том, что при отсутствии существенной потери сна и изменений в графиках работы и отдыха когнитивные функции сохраняются, однако производительность труда, связанного с координированными нейромоторными движениями, может нарушаться [22].

Характерные последствия депривации сна были задокументированы в ходе целого ряда американских, советских и российских космических полетов. Например, в ходе 4-й миссии «Gemini» у командира экипажа в течение нескольких дней прогрессивно росло утомление, вследствие чего экипаж чувствовал раздражительность и потерю терпения в течение последних 2 дней полета. В ходе миссии STS-78 вследствие хронического недосыпания по ходу полета отмечалось прогрессивное снижение бдительности и производительности у всех членов экипажа. В ходе советского 211-суточного полета были зарегистрированы ошибки в работе, напрямую связанные с бессонницей. В ходе космического полета по программе «Мир» укорочение суточной продолжительности сна в среднем до 4,2 часов в течение 8 последовательных суток привело к отчетливому снижению бдительности и значительному ухудшению результатов компьютерного теста отслеживания объекта. У пяти астронавтов миссий

STS-85 и STS-90 в связи с сокращением продолжительности сна произошло ухудшение результатов теста на когнитивную производительность. В результате нарушений ночного сна с продолжительностью менее 5 часов у членов экипажей миссий STS-78 и «Мир» 23/24 произошло значительное снижение рейтинга производительности. В течение последних 12 дней этой миссии «Мир», нарушения сна вызвали снижение точности рассуждений в соответствующем тесте. Во время 438-суточного полета одного из космонавтов «Мир» первые 3 недели миссии и период послеполетной реадaptации были сопряжены с ощущением перегрузки, ухудшением настроения и результатов компьютерного теста отслеживания объекта. Эти нарушения были приписаны связанному с утомлением снижению внимания и нарушению сенсомоторных процессов вследствие воздействия микрогравитации.

В период времени, непосредственно следующий за пробуждением от сна (период «сонной инерции») также может наблюдаться ухудшение выполнения задач и дезориентация. После обычного ночного сна этот период длится от 5 минут до 2 часов с момента пробуждения. Снижение производительности в результате «сонной инерции» может возникать при пробуждении от сигнала будильника или тревожного сигнала во время аварийных ситуаций в космическом полете. Ограничения продолжительности сна, с которым часто сталкиваются космонавты (менее 6 часов сна в сутки) вызывает опасения по поводу безопасности, поскольку в многочисленных наземных исследованиях было показано, что такая депривация сна отрицательно влияет на нейроповеденческие функции, вызывает увеличение времени реакции, проблемы с памятью, замедление когнитивных процессов и ведет к потере внимания. Когда депривация сна продолжается в течение нескольких последовательных суток, значительное снижение производительности может появиться менее чем через неделю.

8.3. Влияние факторов космического полета на циркадианные ритмы и сон

Кроме текущих оперативных потребностей в коррекции суточного распорядка дня для выполнения работ и особенностей освещенности, исследуется влияние других факторов космического полета на сон и циркадианные ритмы. Существуют две гипотезы [23], объясняющие нарушения сна, циркадианных ритмов и последующее снижение производительности: 1) прямое воздействие микрогравитации на мозг через вестибулярный аппарат или двигательные системы; 2) реакции на мультистрессорную среду. Хотя существуют сотни факторов, способных потенциально повлиять на количество и качество сна и вызвать нарушение циркадианных ритмов, наиболее важными из них являются микрогравитация, шум, физические упражнения, рабочая нагрузка, изоляция, укачивание.

На качество сна может оказать влияние совокупность факторов, связанных с микрогравитацией, в частности, сдвиг жидкости в организме в верхнюю часть тела и голову, отсутствие давления на тело, снижение двигательной активности, дискомфорт в скафандре и др. Наземное моделирование микрогравитации с помощью длительного постельного режима и погружения в воду, выполненное на 73 испытуемых в 36 исследованиях привело к сокращению сна с 7,5–8 часов до 6,5 часов, удлинению латентного периода наступления сна, частым пробуждениям и субъективному ухудшению качества сна. Ухудшение сна в этих исследованиях связывали со скукой испытуемых во время исследования. Моделирование длительных космических полетов с помощью изоляции привело к увеличению продолжительности дневного сна с уменьшением длительности ночного сна на 100 минут. Однако подобные наземные исследования, которые сопровождаются скукой и однообразием, могут быть неадекватной симуляцией среды космического полета, в которых вместо скуки космонавты чаще жалуются на чрезмерные рабочие нагрузки.

Мощным стрессирующим фактором окружающей среды, вызывающим нарушения сна, является шум, возникающий при работе оборудования и деятельности экипажа, а также при включении предупредительной или аварийной сигнализации. Шумовое воздействие вызывает раздражительность и бессонницу, особенно в ходе длительных полетов, и может привести к утомлению и снижению производительности труда. Опрос 33 астронавтов миссии «Shuttle» показал, что более половины опрошенных жаловались на нарушения сна до 5-8 раз за ночь из-за шума, а некоторым членам экипажа приходилось использовать беруши во время сна и бодрствования.

Неверный режим физических упражнений также может быть причиной нарушения циркадианных ритмов и сна. При разработке программы ранних советских космических полетов для профилактики сердечно-сосудистой недостаточности и мышечной атрофии предлагался напряженный режим физических упражнений: по 2-2,5 часа 3 дня подряд, после чего предоставлялся день отдыха. Однако, в ходе наземного тестирования таких физических упражнений в модельном исследовании влияния микрогравитации обнаружилось ухудшение настроения испытуемых по сравнению с контролем и зарегистрированы признаки усталости и перетренированности. Физические упражнения также могут отрицательно сказаться на продолжительности и качестве сна, и вызвать фазовые сдвиги циркадианного ритма продукции мелатонина. Выполнение упражнений поздним днем или ранним вечером приводит к сдвигу этого ритма в сторону опережения, тогда как занятия поздним вечером – к сдвигу в сторону запаздывания. Таким образом, адекватные по интенсивности физические тренировки в правильно рассчитанное время суток, могут использоваться в качестве времязадателя циркадианного ритма космонавтов.

Подобно чрезмерным физическим упражнениям, к нарушениям сна и циркадианных ритмов может привести чрезмерная рабочая нагрузка. Накапливающаяся усталость от рабочей нагрузки

приводит к проблемам со сном и увеличению количества ошибок, хотя скорость работы может увеличиваться. Эти явления чаще всего возникают в течение первых 2–6 недель полета, когда космонавтам приходится адаптироваться к новым условиям окружающей среды и справляться со значительной рабочей нагрузкой. Нарушения сна и усталость вследствие чрезмерной нагрузки были задокументированы у командира миссии «Мир-23» Василия Цибилова в 1997 г. Этот космонавт испытывал хроническую усталость из-за того, что ему приходилось устранять утечки охлаждающей жидкости и постоянно ложиться спать за полночь. Эта ситуация усугубилась 12-суточным исследованием сна, в ходе которого его ночной сон многократно прерывался из-за работы научного оборудования и необходимостью сдавать кровь для анализа. По его собственным расчетам, он не имел полноценного ночного сна на протяжении нескольких недель до исследования сна и получил лишь 2 выходных дня за предыдущие 4 месяца. Степень его физического и психического истощения оказалась настолько выраженной, что наземная команда управления полетом выразила серьезную обеспокоенность по поводу его пригодности для выполнения стыковки космического корабля.

Изоляция на космическом корабле, являясь стрессовым фактором, также рассматривается в качестве потенциальной причины, оказывающей влияние на сон и циркадианные ритмы. Изолированная среда и длительное однообразие обстановки считаются возможными причинами нарушений сна. Влияние этих факторов исследовано в модельных экспериментах на Земле с использованием аналоговых сред (полярные миссии, изоляторы, длительный постельный режим, подводные лодки и другие подводные аппараты). В исследованиях, где применяли длительный постельный режим, разные испытуемые демонстрировали ухудшение, улучшение или отсутствие изменений работоспособности, поэтому однозначных результатов получить не удалось. О случаях депрес-

сии, раздражительности и враждебности чаще сообщалось в полярных миссиях, где в отдельных случаях были зарегистрированы когнитивные нарушения. Анализ данных, полученных с подводных лодок, показал, что симптомы психиатрических заболеваний здесь встречаются реже, чем на остальном флоте. Снижение производительности, если оно имеет место, также встречается редко и выражено слабо, что можно объяснить тщательным подбором экипажа. У космонавтов ключевой причиной предотвращения ухудшения производительности в изоляции считается поддержание высокой мотивации на выполнение миссии. Поэтому в относительно коротком космическом полете с участием высококвалифицированного и мотивированного экипажа, изоляция и стрессоры, связанные с ней, вряд ли могут оказать заметное влияние на сон и циркадианные ритмы большинства членов команды.

Нарушения сна и циркадианных ритмов могут потенциально быть обусловлены синдромом космической болезни укачивания. Этот синдром характеризуется сонливостью, недомоганием, раздражительностью, отказом от физической и умственной работы и нарушениями в представлении о положении тела и его частей и об их движениях. Все это может оказывать негативное влияние на производительность. Было установлено, что эпизоды космического укачивания действительно могут являться причиной потери сна и нарушения циркадианных ритмов. Эффект укачивания по-разному влияет на производительность разных космонавтов: некоторые из них демонстрируют снижение работоспособности, другие практически не реагируют на него. Со времен миссии «Shuttle» в марте 1989 г. для купирования симптомов космической болезни укачивания применяют внутримышечные инъекции прометазина. Действительно, противорвотные средства могут существенно улучшить производительность экипажа, имеющего признаки синдрома космической болезни укачивания.

Глава 9. ОСНОВНЫЕ МЕДИЦИНСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕБЫВАНИЯ В КОСМОСЕ И БОРЬБА С НИМИ

9.1. Синдром космической болезни укачивания (SMS: space motion sickness)

Космическая болезнь укачивания – это особый синдром, который испытывают некоторые люди в течение первых нескольких дней пребывания в условиях микрогравитации. Этот синдром может включать такие симптомы, как снижение аппетита, недомогание, вялость, желудочно-кишечный дискомфорт, тошнота и рвота. Симптомы космической болезни укачивания могут приводить к временному снижению самомотивации, нежеланию взаимодействовать с другими людьми, сонливости, усталости, неспособности сосредоточиться, снижению способности выполнять сложные задачи, в особенности в тех случаях, когда признаки нарушения функций желудочно-кишечного тракта проявляются через несколько минут или часов после выхода на орбиту. Чрезмерные движения головой на ранней стадии орбитального полета обычно усиливают симптомы космической болезни укачивания. Исчезновение симптомов обычно происходит в диапазоне от 12 до 72 часов от начала полета (чаще между 30 и 48 часами), и восстановление нормального состояния обычно происходит быстро. Согласно имеющимся данным, частота появления тех или иных симптомов космической болезни укачивания может составлять до 2/3 личного состава экипажа космических кораблей. При этом не обнаружено статистических различий в частоте возникновения симптомов у

мужчин и женщин, представителей разных возрастных групп, новичков (совершающих первый полет) и ветеранов, российских космонавтов и американских астронавтов. Появление симптомов космической болезни укачивания во время первого полета позволяет прогнозировать появление таковых во время повторных полетов. По данным некоторых авторов, частота повторного проявления этого синдрома составляет 77% случаев [24].

Выраженность проявлений космической болезни укачивания обычно подразделяют на 3 степени тяжести: легкую, средней тяжести и тяжелую. Степень тяжести синдрома оказывает существенное влияние на способность космонавта выполнять работу. При легкой степени тяжести данный член экипажа как правило в состоянии продолжать работать, однако, при проявлениях средней тяжести и тяжелой степени болезни работоспособность нарушается и приходится перераспределять нагрузку на оставшихся космонавтов.

При анализе имеющихся многолетних данных можно прийти к заключению о том, что микрогравитация сама по себе не является причиной космической болезни укачивания. Так, из 12 астронавтов, высаживавшихся на Луну, где сила гравитации приблизительно в 6 раз ниже, чем на Земле, лишь трое сообщали о слабых симптомах в виде желудочного дискомфорта или потери аппетита. После обратного перехода с поверхности Луны в условия невесомости симптомов космической болезни укачивания не возникало вовсе.

Сообщения о симптомах этой болезни в ходе первых космических полетов были редкостью. Однако, с увеличением размеров космических кораблей (что привело к увеличению мобильности экипажа) выросло количество сообщений о случаях космической болезни укачивания. Установлено, что к появлению симптомов болезни приводят движения, вызывающие изменения ориентации головы. Космонавты сообщают, что в этом плане более опасны

вертикальные движения головы (вращение по тангажу или крен), нежели горизонтальные движения головы. Как только у члена экипажа обнаруживаются проявления космической болезни укачивания, для предотвращения дальнейшего развития синдрома и скорейшего выздоровления создаются условия для минимизации движений головы и ограничению любых передвижений.

Одним из проявлений космической болезни укачивания является нарушение глазодвигательных реакций, в частности появление спонтанного быстрого движения глаз – атипичного нистагма (особенно вертикального). Известно, что движение глазного яблока в вертикальном направлении осуществляется мышцами, которые иннервируются блоковым нервом и глазодвигательным нервом. Для выяснения клеточных процессов, лежащих в основе атипичного вертикального нистагма, возникающего в условиях микрогравитации, необходимо более детально изучить состояние этих ядер после космических полетов. С этой целью был проведен качественный и количественный светооптический и ультраструктурный анализ ядра блокового нерва у мышей после 30-дневного полета на биоспутнике Бион-М1. В результате было показано, что дендриты мотонейронов в ядре блокового нерва значительно реорганизовали свою геометрию и ориентацию в условиях микрогравитации. Дендриты являются основой пластичности зрелого мозга при различных воздействиях, и поэтому неудивительно, что они заметно отреагировали на микрогравитацию. Количество дендритных ветвей было увеличено, возможно, для усиления уменьшенного притока сигналов в космосе. Для обеспечения таких пластических изменений увеличивались количество и размер митохондрий в соме мотонейронов и аксонов, исходящих от вестибулярных структур [25]. Таким образом, основная роль в адаптации блокового ядра к условиям микрогравитации, по-видимому, принадлежит дендритам мотонейронов, которые перестраивают свою структуру и функции для усиления потока сенсорной информации. Эти ре-

зультаты указывают на причины атипичного нистагма в условиях микрогравитации.

Все-таки в подавляющем большинстве случаев симптомы космической болезни укачивания исчезают к третьим суткам полета. Существует правило, согласно которому выходы в открытый космос до истечения этого срока не предпринимаются, и сообщения о появлении таких симптомов во время пребывания в открытом космосе почти не встречаются.

Существуют значительные индивидуальные различия в возникновении космической болезни укачивания, и, к сожалению, прогнозировать вероятность развития этого синдрома у конкретного космонавта в настоящее время не представляется возможным. Использование некоторых лекарственных препаратов (например, скополамина) может быть эффективным, однако, эти препараты зачастую замедляют адаптацию к условиям космического полета, и после окончания их приема симптомы космической болезни укачивания могут появляться снова. Поиск новых препаратов и схем профилактики и лечения космической болезни укачивания является одной из актуальных проблем современной космической медицины.

Для объяснения механизма происхождения космической болезни укачивания выдвинуты две основные теории – теория сдвига жидкости и теория сенсорного конфликта (также известная как теория нейронного несоответствия, теория сенсорного несоответствия или сенсорной перестройки). Хотя обе теории имеют некоторые достоинства, и ни одна из них не идеальна, теория сдвига жидкости представляется менее достоверной для объяснения укачивания во время космического полета. Таким образом, наиболее обоснованной в настоящее время считается теория сенсорного конфликта. Теория сенсорного конфликта укачивания учитывает, что ориентация человека в трехмерном пространстве при нормальной гравитации основана как минимум на четырех сенсорных

входах в центральную нервную систему. Рецепторы отолитового аппарата предоставляют информацию о линейных ускорениях и наклоне относительно вектора силы тяжести; рецепторы полукружных каналов предоставляют информацию об угловом ускорении; зрительная система дает информацию об ориентации тела относительно объектов окружающего мира; тактильные рецепторы, рецепторы давления и соматосенсорной и кинестетической системы предоставляют информацию о положении конечностей и туловища. В обычных условиях информация от этих рецепторов дополняет друг друга, и соответствует ожидаемой картине, сформированной на основе предыдущего опыта и хранящейся в памяти. Когда окружающая среда изменяется таким образом, что информация от различных сенсорных систем становится несовместимой и не соответствует ранее сохраненной информации, это может привести к укачиванию, как это и происходит в космическом полете.

В условиях микрогравитации сенсорный конфликт может происходить несколькими путями. Во-первых, противоречивой может оказаться информация о наклонах и вращениях, поступающая от рецепторов отолитов и полукружных каналов. Во-вторых, может возникать сенсорный конфликт между зрительной и вестибулярной информацией. При движении в пространстве; глаза передают в мозг информацию, указывающую на движение тела, однако подтверждающие импульсы от отолитов не поступают. Третий тип конфликта может существовать в космосе из-за различий в перцептивных привычках и ожиданиях. На Земле на основании богатого индивидуального опыта сформировано нейронное хранилище информации о внешнем виде окружающей обстановки и определенным ожиданиям относительно функциональных отношений (например, о понятиях «вверх» и «вниз»). В космосе эти перцептивные ожидания могут видоизменяться, особенно во время инверсионных иллюзий, описанных выше.

У теории сенсорного конфликта имеются и недостатки. К ним относятся: невозможность точного прогнозирования возникновения симптомов космической болезни укачивания у конкретного индивидуума; невозможность объяснить те ситуации, когда есть конфликт, но нет болезни; неспособность объяснить специфические механизмы, с помощью которых конфликт фактически вызывает рвоту.

Некоторые исследователи предложили существование механизма, дополняющего теорию сенсорного конфликта для объяснения индивидуальных различий в возникновении космической болезни укачивания. Предполагается, что некоторые люди имеют легкий дисбаланс (например, разница в весе на 1 г) между правым и левым отолитами. Действительно представляется маловероятным, что у всех людей правый и левый отолиты всегда весят одинаково. На Земле эти различия компенсируются центральной нервной системой, однако, в космосе эти различия исчезают, а вместе с ними исчезает и компенсация. Результатом будет временная асимметрия, вызывающая вращательное головокружение, несоответствующие движения глаз и изменения позы, продолжающиеся до тех пор, пока дисбаланс не будет компенсирован или приспособлен к новой ситуации. Похожий дисбаланс возникнет при возвращении на Землю, где реадaptационные изменения приводят к послеполетным вестибулярным расстройствам. Согласно этой гипотезе, более восприимчивыми к космической болезни укачивания являются лица, характеризующиеся большей степенью асимметрии в морфологии отолитов.

Было предпринято множество попыток профилактики и купирования синдрома космической болезни укачивания. Одной из основных задач является прогнозирование возникновения этого синдрома у конкретных людей. С этой целью использовались различные подходы: анкетирование, анамнез, характеристика опыта и черт личности, тестирование вестибулярной функции в сре-

дах, вызывающих укачивание, и физиологических коррелят. Несмотря на многочисленные попытки прогнозирования, результаты в целом выглядят разочаровывающими, поскольку зачастую характер и выраженность симптомов, возникающих в условиях космического полета, разительно отличались от результатов наземных предполетных испытаний. Таким образом, единого адекватного предполетного способа прогнозирования возникновения синдрома космической болезни укачивания в полете выработать пока не удалось. Похоже, что существует лишь один достаточно точный предиктор данного синдрома – это сам космический полет. Действительно, согласно имеющимся данным более 80% космонавтов и астронавтов в ходе повторных полетов испытывали те же самые симптомы космической болезни укачивания, развивавшиеся в такой же последовательности, что и во время первого полета.

Хотя попытки прогнозирования не дали результатов, были разработаны меры профилактики космической болезни укачивания. К таким мерам, в частности, относятся предполетные тренировки, обеспечение минимизации движений головы и тела в первые дни полета, использование фармакологических препаратов. К сожалению, попытки предотвращения космической болезни укачивания путем отбора лиц с высокой толерантностью к укачиванию при вестибулярной стимуляции, предпринятые в ходе предполетной подготовки российских космонавтов, не увенчались успехом. Тренировки вестибулярной системы связаны с применением перекрестных угловых ускорений, что предъявляет серьезные требования к будущим членам экипажа, однако, эффективность этих тренировок в отношении профилактики космической болезни укачивания остается сомнительной. В связи с этим подобные тренировки вестибулярной системы в рамках американской космической программы в настоящее время не используются. Вместо этого в NASA была разработана профилактическая методика, основанная на обучении аутогенной терапии (техника само-

регуляции). Эта техника оказалась весьма успешной в плане контроля за некоторыми симптомами, связанными с функцией вегетативной нервной системы, такими как тошнота и рвота. У некоторых людей формирование аутогенной обратной связи происходило всего за шесть часов подготовки и приводило к улучшению толерантности к движению. Однако, эта методика характеризуется разной степенью эффективности и работает не во всех случаях.

Наиболее популярными фармакологическими препаратами для традиционной профилактики и купирования симптомов космической болезни укачивания являются скополамин и комбинация скополамина и декстроамфетамина, принимаемых перорально. В настоящее время чаще используется прометазин, уменьшающий симптомы укачивания у большинства (но не у всех) членов экипажа. К сожалению, недавно было установлено, что иногда этот препарат может вызвать вредные побочные эффекты: снижает работоспособность, ухудшает время реакции, способность к мышлению, распознавание объектов, и негативно влияет на настроение и сон.

9.2. Ортостатическая непереносимость

Синдром ортостатической непереносимости заключается в появлении головокружения, предобморочного состояния и даже обморока вследствие недостаточного кровоснабжения мозга при переходе из положения лежа в положение стоя. Ортостатическая непереносимость является послеполетным явлением и обычно проявляется в ранние сроки после приземления. Она связана не только с потерей жидкости в ходе космического полета. Ортостатическая непереносимость предположительно вызывается сочетанием трех взаимосвязанных факторов: снижением объема циркулирующей крови, нарушенной способностью кровеносных сосудов расширяться или сужаться для поддержания артериального давления, снижением нагнетательной функции сердца.

В космическом полете организм теряет жидкость, что приводит к уменьшению объема циркулирующей крови. После возвращения на Землю тело попадает в условия гравитации, притягивающей кровь к нижним конечностям, что способствует возникновению ортостатической гипотензии (рис. 5.1.). Другим фактором, определяющим ортостатическую гипотензию, является удлинение латентного периода активации реакций симпатической нервной системы, направленных на контроль артериального давления. В нормальных условиях при изменении позы симпатическая нервная система вносит немедленные корректировки в сердечную деятельность (стимуляция) и сосудистый тонус для поддержания кровотока и давления. Эти корректировки происходят с участием нейромедиатора норадреналина, вызывающего сужение сосудов, что приводит к поддержанию артериального давления на требуемом уровне и обеспечению адекватного притока крови к органам. В космосе гидростатические градиенты исчезают и при изменениях позы рефлекторные сосудодвигательные реакции симпатической нервной системы постепенно выключаются («забываются»), и не сразу включаются после приземления. Эти рефлекторные реакции симпатической нервной системы вызываются уменьшением стимуляции артериальных барорецепторов, расположенных главным образом в области каротидного синуса, вследствие снижения непосредственного давления на них артериальной крови. В ситуации повышения давления крови в каротидном синусе срабатывает противоположная реакция, направленная на торможение сердечной деятельности и расширение кровеносных сосудов для снижения артериального давления. Эта реакция осуществляется с участием парасимпатической нервной системы. Существуют экспериментальные данные, полученные на животных, о том, что в условиях космического полета чувствительность каротидных барорецепторов постепенно снижается, и скорость восстановления их чувствительности в послеполетный период пока не установлена.

Дополнительно кровенаполнение органов регулируется локальными вазотоническими механизмами. В условиях нарушенного кровоснабжения стенка кровеносных сосудов способна выделять локально действующие сосудорасширяющие вещества, улучшающие кровоток. Визуально этот эффект может проявляться в виде реактивной гиперемии. В соответствии с данным механизмом, когда после возвращения космонавта на Землю кровь приливает к его ногам, сосуды нижних конечностей могут отреагировать не спазмом, а дальнейшим расширением, что позволяет крови скапливаться в нижней части тела, «обкрадывая» верхнюю часть тела и голову космонавта.

Выполненные исследования также указывают на различия в механизмах поддержания артериального давления после космического полета у мужчин и женщин. Женский организм обычно отличается более высокой частотой сердечных сокращений и более низким сосудистым сопротивлением, чем мужской. Таким образом, когда женщины-космонавты возвращаются на Землю, их сосудистое сопротивление, и без того более низкое, может оказаться недостаточным для поддержания артериального давления в условиях меньшего объема крови. В послеполетном анализе, выполненном NASA после кратковременного космического полета, 100% обследованных женщин-астронавтов имели признаки ортостатической гипотензии, тогда как у астронавтов-мужчин такие признаки обнаружены лишь в 20% случаев.

Возраст также сказывается на стратегии ортостатических реакций сердечно-сосудистой системы. В качестве примера возрастного астронавта часто приводят 77-летнего Джона Гленна, который успешно адаптировался к состоянию микрогравитации и не испытывал ортостатических проблем после возвращения на Землю. На этом примере было показано, что у пожилых людей обычно происходит активный выброс норадреналина, помогающий поддерживать артериальное давление вследствие увеличения сосуди-

стого сопротивления как до, так и после космического полета. У Гленна также был обнаружен более высокий сердечный выброс, чем у других астронавтов-мужчин, возможно, из-за большего венозного возврата крови к сердцу. Этот более высокий выброс в сочетании с нормальным сосудистым сопротивлением, по всей видимости, и позволил Гленну поддерживать адекватное кровяное давление и избежать ортостатической непереносимости в день приземления.

В связи с проблемой ортостатической непереносимости в настоящее время предпринимаются активные попытки выяснить, не развиваются ли в ходе длительного космического полета аномалии в миокарде, способные повлиять на его сократительную способность. Для это на МКС выполняются исследования с использованием методов эхокардиографии, магнитно-резонансной и компьютерной томографии.

Для моделирования ортостатической непереносимости используют длительный постельный режим лежа с наклоном кровати на 6° в направлении головного конца. В таком положении испытуемый остается до нескольких месяцев, выполняя все необходимые действия, включая приемы пищи и даже душ. В результате наблюдается смещение крови к головной части тела, снижение артериального давления и объема циркулирующей крови, снижение физической активности, подобное тем, которые возникают в условиях космического полета.

Исследования с использованием длительного постельного режима впервые показали, что со временем в таких условиях возникает угнетение барорецепторных рефлексов. Фактически, при постоянном воздействии повышенного давления крови барорецепторы, по-видимому, становятся менее чувствительными. Подобные результаты позже были обнаружены и во время космического полета. Эти изменения чувствительности и реакции на раздражение барорецепторов происходят в течение нескольких

дней полета. Аналогичным образом, может потребоваться несколько дней, чтобы произошла реадаптация барорецепторов после возвращения на Землю.

Когда в конце теста с длительным постельным режимом кровать с испытуемыми поднимали в вертикальное положение, у большинства испытуемых возникали ортостатические симптомы, в частности, головокружение и проблемы с удержанием равновесия даже после нескольких дней пребывания в постели. После трех месяцев постельного режима симптомы становятся более выраженными, наблюдается отчетливая ортостатическая гипотензия. При этом требуется значительное время, прежде чем испытуемые смогут стоять и ходить без посторонней помощи. Обычно большинство проблем со стоянием и ходьбой заканчиваются в течение нескольких дней, после чего начинают применять упражнения, направленные на восстановление мышечной силы. Полное восстановление мышечной силы и, в особенности, костной ткани может занять намного больше времени – до 6 месяцев.

В настоящее время по-прежнему разрабатываются и совершенствуются методы профилактики и купирования сердечно-сосудистых проблем, возникающих в полете и после возвращения в условия земной гравитации. Поскольку факторы, способные вызвать сердечно-сосудистые нарушения в космическом полете, многочисленны, предпочтение отдается комплексному воздействию. В настоящее время обычно используют предполетное тестирование, в полете – физические упражнения, помещение нижней части тела в условия отрицательного давления, обильное питье перед входом в атмосферу и реабилитация после возвращения на Землю.

Физические упражнения помогают преодолеть ортостатическую непереносимость, возникающую после полета, путем смягчения выраженности тахикардии и гипотензии в положении стоя. Перед полетом особое внимание уделяется ежедневной физической подготовке, включающей бег и аэробные упражнения.

Аэробные упражнения в полете эффективны для поддержания послеполетной аэробной способности, однако, их положительное влияние на ортостатическую непереносимость не доказано. Обычный режим физических упражнений предусматривает тренировки по меньшей мере раз в два дня после выхода на орбиту, однако, теоретически обоснованы более интенсивные ежедневные тренировки. На основании опыта полетов на станции «Мир», рекомендованная продолжительность упражнений составляет 2 часа. Во время тренировок российские космонавты иногда используют манжеты, накладываемые на верхнюю часть бедра для препятствия свободному оттоку венозной крови от нижних конечностей и уменьшения притока крови к голове. Данные об эффективности этих манжет недостаточны, однако многие космонавты сообщают о значительном облегчении от заложенности носа и отека лица, связанных с микрогравитацией.

Устройство «Чибис», создающее отрицательное давление в нижней части тела, выглядит в виде контейнера, охватывающего нижнюю часть живота и нижние конечности для поддержания контролируемого давления ниже окружающего. Это устройство используется в условиях мониторинга сердечного ритма и артериального давления. «Чибис» обеспечивает постоянную декомпрессию и поддержание давления в контейнере до -60 мм рт.ст. по сравнению с окружающим. Длительность декомпрессии может составлять от 10 секунд до 10 минут, однако если декомпрессия накладывается слишком быстро, могут возникать проблемы, аналогичные послеполетной ортостатической непереносимости. Подобно тому, как это происходит на Земле в положении стоя, декомпрессия вызывает повышение артериального давления для поддержания притока крови к верхней части тела и голове. Декомпрессия на орбите провоцирует увеличение объемов ног, так как жидкость смещается вниз быстрее, чем в контрольных испытаниях на Земле. Также возникает более значительная тахикардия (для

поддержания артериального давления в верхней части тела), чем на Земле. Эти результаты могут указывать на снижение тонуса мышечного слоя кровеносных сосудов ног и меньшее сопротивление расширению сосудов под давлением, а также ослабление способности реагировать на кратковременные изменения артериального давления в целом.

Другие способы профилактики послеполетной ортостатической непереносимости включают использование эластичных нагрудных костюмов «Пингвин» российского производства, предназначенных для стимуляции мышц-разгибателей и венозного возврата крови от нижних конечностей, фармакологические препараты, электромиостимуляцию.

Важным мероприятием, предшествующим возвращению на Землю, является увеличение объема плазмы крови. Хорошо известно, что употребление одного литра сбалансированного солевого раствора приводит к увеличению объемной нагрузки плазмы крови примерно на 400 мл на период не менее 4 часов. Такая методика используется космонавтами для облегчения проявлений ортостатической непереносимости при приземлении. Протокол приема жидкости состоит из 1 литра воды или сока и 8 солевых таблеток примерно за 1 час до ухода корабля с орбиты. В результате в пищеварительный тракт поступает 1 литр изотонического раствора, который затем всасывается и увеличивает объем плазмы. Такой метод оказался эффективным для кратковременных полетов. У 26 космонавтов, которые практиковали данный метод, снижалась выраженность тахикардии, лучше поддерживалось артериальное давление и не было обмороков после приземления (по сравнению с 33% космонавтов в контрольной группе). Однако, эффективность метода снижается с увеличением времени нахождения на орбите. Возможно, другие факторы, кроме сердечно-сосудистых нарушений, становятся более важными в патогенезе ортостатической непереносимости при длительных полетах.

В период посадки астронавты Шаттла одевали антигравитационные костюмы. Эти костюмы содержат воздушные баллоны давления в области нижних конечностей. Когда астронавт надувает баллоны, жидкость перемещается в верхнюю часть тела. Это помогает сердцу перекачивать кровь более эффективно, перераспределяя ее из нижних конечностей. Российские космонавты перед посадкой туго обматывают нижнюю часть тела эластичными ремнями, что создает своеобразный каркас для достижения того же эффекта, что и антигравитационный костюм.

Любой член экипажа, находившийся на орбите более 30 дней, в период посадки находится в положении лежа, чтобы снизить риск ортостатической непереносимости при входе в атмосферу и приземлении. Однако существует опасение, что член летного экипажа, не сможет выйти из лежачего кресла без посторонней помощи.

9.3. Атрофия мышц

В организме человека постоянно идет процесс синтеза мышечных белков из аминокислот. Мышечные белки постепенно расщепляются и заменяются новыми, при этом в нормальных физиологических условиях существует баланс между синтезом и расщеплением мышечных белков. Когда баланс нарушается, и организм не имеет возможности восполнить расщепленные мышечные белки, возникает потеря мышечной массы, которая может привести к мышечной атрофии. Одной из основных причин этого явления является отсутствие мышечной активности, поэтому длительный постельный режим служит хорошей моделью, в которой мышечная активность сводится к минимуму. Адекватность этой модели подтверждается повышенной экскрецией азота с мочой и потерей мышечной массы, как это наблюдается в условиях космического полета. Мышечная атрофия в первую очередь возникает в

антигравитационных мышцах, которые в этих условиях уже не несут нагрузки по поддержанию массы тела. Среди возможных факторов, приводящих к избыточному выделению азота, мышечная атрофия является основным.

В условиях продолжительного полета у всех космонавтов высокий уровень экскреции азота сохраняется на протяжении всего полета. Это свидетельствует о серьезном нарушении азотного баланса, сопровождающего мышечную атрофию. Эта потеря азота характеризуется потерей от 15 до 30% мышечной массы и силы мышц нижних конечностей. Такие изменения в мышцах могут стать значительным препятствием для активной работы в условиях невесомости, гравитации на поверхности Марса и после возвращения на Землю.

Физиологические и биохимические механизмы, лежащие в основе мышечной атрофии, исследователи пытаются изучать в экспериментах на животных. Хотя детальные механизмы мышечной атрофии пока остаются неизвестными, некоторые аспекты выглядят очевидными. Мышечная атрофия сопровождается снижением синтеза мышечных белков и, в некоторой степени, повышением их расщепления. В экспериментах на крысах, находящихся в подвешенном состоянии (рис. 6.1), установлено, что растяжение и нагрузка бездействующих мышц ног предотвращает атрофию мышц и стимулирует синтез в них белка; при этом синтез мышечных белков особенно заметно увеличивается при дополнительном использовании электростимуляции мышц. Стимуляция синтеза мышечных белков при растяжении была подтверждена на культурах мышечных клеток. Активно изучаются положительные эффекты электрической стимуляции мышц с использованием различных комбинаций частоты и силы тока. Показано также, что стимуляция кожных механорецепторов может уменьшать выраженность мышечной атрофии в условиях разгрузки задних конечностей у крыс.

Для исследования атрофии мышц в условиях космического полета в настоящее время используется сочетание современных методик: электронной микроскопии, электромиографии, компьютерной томографии (КТ) и исследование метаболизма стабильных изотопов. Эти методики позволяют изучить клеточные и молекулярные механизмы, лежащие в основе снижения массы и силы мышц. Перечисленные экспериментальные технологии дополняются методами иммунохимии, рекомбинантных ДНК и клонированием генов. Гены, кодирующие многие основные белки мышц, а также их управляющие элементы уже секвенированы. Одной из приоритетных задач в данной области является выявление связи между механическим стрессом, гормональным фоном и питанием с контролем экспрессии этих генов.

Основным способом борьбы с атрофией мышц в космическом полете являются физические упражнения. Увеличение интенсивности и продолжительности физических упражнений, выполняемых астронавтами на «Skylab» и космонавтами на станции «Мир» привели к заметному снижению потери мышечной массы и силы по сравнению с предыдущими полетами, однако полностью предотвратить появление признаков мышечной дистрофии все же не удалось. При планировании программы физической нагрузки в полете обычно ориентируются на следующие рекомендации: в ходе кратковременных миссий – пятнадцать минут ежедневных упражнений, в ходе продолжительных миссий – два ежедневных часовых занятия. На МКС используют беговую дорожку (для сохранения аэробной мощности), велоэргометр (для сохранения аэробных способностей), резистивные тренажеры и эспандеры (для сохранения мышечной массы, прочности и минерального состава костей), а также оборудование для тренировки силы захвата кисти (для выходов и работы в открытом космосе). Во время упражнений состояние членов экипажа и все физиологические данные контролируются компьютером.

Беговую дорожку используют для ходьбы и бега с помощью различных стратегий максимально точного моделирования земной гравитации. В тренажере предусмотрена регуляция физических нагрузок, специальная удерживающая система для стабилизации космонавта и (в случае необходимости) система распределения груза по телу в невесомой среде. Беговая дорожка используется в качестве тренажера при упражнениях на выносливость постуральной мускулатуры, для тренировки ударной нагрузки на скелет при аэробных упражнениях. Воздушная струя из воздуховода используется для высушивания пота в ходе занятий.

Велоэргометр, обеспечивающий нагрузку на руки или ноги, контролируется ручной или компьютерной регулировкой. Велоэргометрия выполняется в положении сидя или лежа на спине. При этом осуществляется компьютерный мониторинг физиологических показателей, синхронизированный по времени с другими дополнительными анализами. Данные о нагрузке обычно состоят из показателей работы (в Вт) и скорости вращения педалей (в об/мин) для использования системой сбора данных. Велоэргометр используется как для аэробных, так и для анаэробных упражнений для поддержания выносливости мышц нижней части тела, для тренировки рук, а также в качестве 2-часового упражнения перед работой в открытом космосе.

На борту МКС имеется сложный тренажер для упражнений с резистивной нагрузкой (рис. 9.1.). Это устройство создает регулируемую эластичную нагрузку для тренировки различных мышц. Упражнения: приседания, становая тяга, подъемы пяток, тяга в наклоне, стоя, нагрузка на бицепсы, жим лежа, сгибание запястий, жим от плеч и др. (из архива NASA)*.

* https://www.descsite.nl/Students/Mulder/Mulder_cover.htm



Рис. 9.1. Тренажер для тренировки резистивной нагрузки на МКС

поддержания мышечной и костной массы и объема, а также для обеспечения тренировочной нагрузки на скелет. Кроме того, некоторые основные упражнения специально направлены на тренировку силы и выносливости постуральных мышц.

Дополнительные меры профилактики мышечной атрофии в космосе включают аминокислотные добавки к пище, являющиеся источником для синтеза белка. Действительно, результаты экспериментов с использованием длительного постельного режима показали, что такие аминокислотные добавки способствуют поддержанию скорости синтеза белка и массы тела.

9.4. Деминерализация костей

Земные исследования с использованием длительного постельного режима человека показали уменьшение костной массы и увеличение содержания кальция в моче, что подтвердило адекват-

Оно включает в себя части с поручнями, ремнями, турниками, голеностопными манжетами, ремнями для приседаний и т.д.), которые позволяют выполнять различные упражнения. Тросы с каждой стороны плечевых лямок соединены с двумя резервуарами, каждый из которых содержит серию «гибких пакетов», позволяющих регулировать сопротивление кабелей. Это устройство используется для тренировки силы и выносливости всех основных групп мышц, для под-

ность данной методики для моделирования потенциальных изменений костной ткани при длительном космическом полете. Длительная гиподинамия во время постельного режима приводит к значительным и длительным потерям кальция из костной ткани и азота из мышц и при значительной атрофии костной и мышечной систем организма. Эти изменения обнаруживаются у всех испытуемых, но сильно различаются по степени выраженности от субъекта к субъекту. В основе этих различий могут лежать генетические факторы, однако до сих пор не были идентифицированы конкретные гены, способные выступать в качестве факторов риска для остеопороза. Потенциально важными в этом плане могут быть кумулятивные эффекты ряда генов (включая, например, ген рецептора витамина D). Выявление таких генов в настоящее время считается приоритетной задачей космической генетики и физиологии.

Данные земных исследований с использованием постельного режима и данные, полученные в космических полетах, свидетельствуют о том, что потеря костной массы при гиподинамии неоднородна. Кости, подвергающиеся наименьшей нагрузке, страдают в большей степени. В наблюдениях, выполненных на борту лаборатории «Skylab», установлено, что скорость потери кальция составила 0,4 – 0,5% от общего количества кальция в организме в месяц, несмотря на ежедневные многочасовые физические тренировки с помощью серии упражнений с использованием эластичных шнуров для сопротивления движениям, велоэргометра и ходьбы на беговой дорожке. При этом потеря кальция в нижних конечностях оказалась приблизительно в 10 раз большей, чем в остальной части тела. Это могло привести за 8 месяцев полета к снижению плотности костей ног сравнимому с тем, что отмечается при паралитическом полиомиелите. Также относительно высокой оказалась потеря костной ткани позвоночника. Исследования, выполненные на обездвиженных кроликах, показали заметную атрофию сухожилий и связок уже через месяц. Таким образом, дефор-

мации, вывихи и даже разрывы связок могут возникать с большой вероятностью в более раннее время, чем переломы костей.

Клеточные механизмы потери минералов костной тканью пока остаются неизвестными. Усиленная экскреция кальция с повышенным содержанием гидроксипролина в моче свидетельствует о повышенном разрушении костей. С другой стороны, гистологическое исследование костей крыс на кораблях серии «Космос» показало подавление формирования костей. Многие ученые считают, что костная масса уменьшается в условиях микрогравитации потому, что отсутствие нагрузки на кости замедляет образование остеобластов. Меньшее количество остеобластов, наряду с повышением скорости разрушения костей, приводит к быстрой потере костной массы.

Каким образом микрогравитация подавляет развитие остеобластов? Ключевым химическим веществом, отвечающим за развитие остеобластов из клеток-предшественников, является фермент креатинкиназа В. Исследователи пытаются выяснить, каким образом в организме регулируется активность этого фермента и как на эти процессы действует пониженная гравитация. Есть надежда, что полученные знания укажут на способ увеличения образования остеобластов в космосе.

Гиперкальциурия, связанная с потерей костных минералов в космическом полете, увеличивает вероятность образования камней в почках. Хотя от 75 до 80% почечных камней содержат кальций, вероятность камнеобразования зависит не только от повышенной концентрации кальция, но и от других факторов, таких как рН мочи, концентрации неорганических ионов (магния, калия, фосфора) и органических соединений (мочевой кислоты, цитрата и оксалата). Исследования на Земле с использованием постельного режима показали небольшое повышение рН мочи и отсутствие изменения концентрации цитрата в моче, которая обычно повышается с повышением уровня кальция в моче. Оба эти фактора способствуют

снижению растворимости солей кальция. После трехмесячного теста с постельным режимом у нескольких испытуемых были обнаружены симптомы мочекаменной болезни. В целом вероятность образования камней в мочевыводящих путях во время космического полета невелика, особенно если принимать обильное питье и поддерживать обильные объемы мочи; однако, такое камнеобразование может иметь катастрофические последствия для здоровья и функциональной активности космонавта.

С целью предотвращения деминерализации костей в космосе предпринимаются попытки механического воздействия на кости. Расчеты показывают, что механическое воздействие в полете должно обеспечить действие на скелет, эквивалентное 4 часам ходьбы в день на Земле. Экспериментальные данные показывают, что в естественных наземных условиях костная масса контролируется не только высокоамплитудной низкочастотной деформацией, возникающей в результате механической нагрузки на кости, связанной с энергичными физическими упражнениями, но и с высокочастотным напряжением малой амплитуды, которое мускулатура постоянно оказывает на кости в положении сидя или стоя. Механические нагрузки вызывают небольшую деформацию костей, величина которой зависит от величины нагрузки, эластичности и геометрии кости. Превышение верхнего индивидуального предела деформации приводит к ремоделированию кости в сторону увеличения ее массы. Наоборот, механическая деформация ниже нижнего индивидуального предела вызывает адаптивное ремоделирование в сторону уменьшения костной массы.

Результаты наземных исследований свидетельствуют о том, что стимуляцию роста костей могут вызвать вибрации, даже небольшой интенсивности. Эксперименты на овцах, подвергавшимся ежедневным вибрациям в течение 20 минут, вызывали повышенное образование трабекулярной ткани костей по сравнению с контрольной группой овец. Кроме того, когда животные, лишенные

регулярной физической активности, подвергались ежедневным сеансам вибрации, костеобразование оставалось на уровне, близком к нормальному. Интересно, что у части животных, не подвергавшихся воздействию вибрации, но имевших ежедневную физическую активность, обнаруживались признаки потери костной массы. Эти данные показывают, что вибрации небольшой интенсивности во время космического полета могут явиться альтернативой трудоемким режимам упражнений космонавтов в длительном космическом полете.

Предотвращению деминерализации костей в условиях микрогравитации должен способствовать и пищевой рацион. Однако кроме достаточной калорийности пищи, содержания в ней белка и кальция, в отношении других нутриентов, связанных с метаболизмом костей (фосфором, натрием, калием и магнием), особых требований или ограничений для условий микрогравитации не существует. Рекомендации по их содержанию в пище космонавтов не отличаются от земных. Базовое содержание кальция в суточном рационе космонавтов составляет 1000 мг. Попытки включения повышенного количества кальция и фосфора в рацион с целью профилактики деминерализации костей в условиях экспериментов с длительным постельным режимом на Земле и на космических станциях «Мир» и «Skylab» не дали желаемых результатов. В этих условиях равновесие между потреблением и экскрецией кальция поддерживалось до 3 месяцев, после чего прогрессивно увеличивалась фекальная экскреция кальция, и возникал отрицательный кальциевый баланс. Поэтому в настоящее время уровень потребления кальция в космическом полете не превышает 1000 мг/сутки. Повышенное содержание фосфора в рационе подавляет тенденцию к гиперкальциурии, однако, вместо этого постепенно увеличивается экскреция кальция с калом. Кроме того, необходимо ориентироваться на благоприятное соотношение кальция и фосфора в пище, составляющее 1:1,8. Превышение этого соотношения в сторону

фосфора оказывает связывающее действие на кальций в кишечнике и вызывает склонность к ингибированию всасывания кальция. Рекомендуемый уровень потребления магния составляет 350 мг/сутки. Немногочисленные исследования влияния магния на минерализацию костей в космическом полете в целом не указывают на какие-либо существенные влияния за исключением случаев низкого потребления магния в течение очень длительного времени, приводящего к снижению костной массы.

К настоящему времени предприняты многочисленные попытки фармакологической профилактики и купирования остеопороза и деминерализации костей в условиях космического полета и длительного постельного режима на Земле. Испытания препаратов проводились как на животных, так и на человеке. Основными способами фармакологического воздействия являлись прием гормона кальцитонина и его аналогов, пероральный прием кальция и витамина D, прием пищевых добавок с фосфатами, прием препаратов из группы бисфосфонатов (этидроната, памидроната, ризедроната и др.). Механизм действия последних связан с тем, что они ингибируют активность ферментов, отвечающих за продукцию мевалоната, необходимого для жизнедеятельности остеокластов [26]. В наблюдениях с использованием постельного режима прием некоторых из этих препаратов прерывал прогрессирование потери минералов из пяточной кости в поздние сроки тестирования. Бисфосфонаты при приеме в высоких дозах и в течение длительного времени не только подавляют функцию остеокластов, но и вызывают повышенное накопление вновь образовавшихся остеоцитов. В целом бисфосфонаты являются перспективной группой лекарственных препаратов не только для космической медицины, но и для рутинного земного лечения потерь костной массы при постменопаузном остеопорозе, для поддержания минеральной плотности костной ткани в области шейки бедра, позвоночника, таза у больных, находящихся на длительном постельном режиме.

Другим перспективным классом препаратов являются глюкозозависимые гормоны и пептиды. Одним из них является инсулинотропный пептид, участвующий в выработке инсулина, к которому на мембране остеокластов некоторых костей имеются рецепторы. В настоящее время предпринимаются попытки выяснить, можно ли предотвратить потерю костной ткани в космосе, модулируя выработку собственного эндогенного гормона или принимая его в виде инъекций или таблеток.

В NASA разработан план исследований в области космической медицины, направленных на систематическое снижение и устранение рисков для здоровья, безопасности и повышение производительности труда во время и после космического полета. Этот план получил название «критического пути» (<http://criticalpath.jsc.nasa.gov/>). В этом проекте упоминаются 55 рисков, 11 из которых связаны с изменениями опорно-двигательной системы. Особую озабоченность вызывает ускорение возрастного остеопороза, неспособность восстановить структуру кости, утраченную после космических полетов, повышенный риск переломов при возвращении к активности в условиях земной гравитации. Пункты плана исследований, относящиеся к костной системе, включают следующие вопросы:

– Будет ли продолжаться потеря костной массы в ходе миссий, длительность которых превышает шесть месяцев, или в конечном счете в какое-то время костная масса и абсолютная минеральная плотность костей стабилизируются?

– Каковы наиболее важные предикторы потери костной массы при длительном воздействии гипогравитации, с учетом этнической принадлежности, пола, возраста и морфометрии костей?

– Является ли потеря костной массы обратимой и в какие сроки?

– Приводит ли длительное воздействие гипогравитации к незаращению переломов? Какие данные подтверждают изменение морфометрии позвонков во время и после длительного космического полета?

– Какие диагностические методы можно использовать во время многолетних космических миссий для мониторинга и количественной оценки изменений костной массы и прочности (например, биохимические маркеры, двойную рентгеноабсорбциометрию, УЗИ)?

– Существуют ли другие важные механизмы потери костной массы при гипогравитации, имеющие решающее значение для разработки эффективных мер восстановления (например, измененное гидростатическое давление, изменения кровотока, перестройки иммунной системы)?

– Существует ли оптимальное сочетание упражнений и фармакологических средств, направленных на минимизацию снижения костной массы в условиях гипогравитации?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельник С.Н. Физиология сенсорных систем и высшей нервной деятельности: учебно-методическое пособие / С.Н. Мельник, В.А. Мельник, Ю.В. Висенберг [и др.]. – Гомель: ГомГМУ, 2021. – 186 с.

2. Агаджанян Н.А. Нормальная физиология: учебник для студентов медицинских вузов / Н.А. Агаджанян, В.М. Смирнов. – М., Медицинское информационное агентство, 2009. – 520 с.

3. Ross M.D. Effects of gravity on vestibular neural development / M.D. Ross, D.L. Tomko // *Brain Research Reviews*. – 1998. – № 28. – С 44-51.

4. Lackner J. Human orientation and movement control in weightless and artificial gravity environments / J. Lackner, P. DiZio // *Experimental Brain Research*. – 2000. – № 130. – С. 2-6.

5. Thornton W.E. Electronystagmography and audio potentials in spaceflight / W.E. Thornton, W.P. Biggers, W.G. Thomas [et al.] // *Laryngoscope*. – 1985. – № 95. – С. 924-932.

6. Palmieri R.M. The Hoffmann reflex: Methodologic considerations and applications for use in sport medicine and athletic training research / R.M. Palmieri, C.D. Ingersoll, M.A. Hoffman // *Journal of Athletic Training*. – 2004. – № 39. – С 268-277.

7. Paloski W.H. Vestibular ataxia following shuttle flights: effects of microgravity on otolith-mediated sensorimotor control of posture / W.H. Paloski, F.O. Black, M.F. Reschke [et al.] // *American Journal of Otolaryngology*. 14: 9-17. 1993.

8. Bloomberg J.J. Effects of spaceflight on locomotor control. Extended Duration Orbiter Medical Project / J.J. Bloomberg, C.S. Layne,

V. McDonald [et al.] // Final Report 1989-1995. Sawin CF, Taylor GR (eds). – Houston, TX: NASA SP-1999. – 1999. – Chapter 5.5. – 534 p.

9. Clement G. Alteration of eye movements and motion perception in microgravity / G. Clement // Brain Research Reviews. – 1998. – № 28. – P. 161-172.

10. Lathan C. Changes in the vertical size of a three-dimensional object drawn in weightlessness by astronauts / C. Lathan, Z. Wang, G. Clement // Neuroscience Letters. – 2000. – № 295. – 37-40.

11. Clement G. Fundamentals of space medicine / G. Clement. – Springer, Dordrecht, Netherlands, 2005. – 361 p.p.

12. Fritsch-Yelle J.M. An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight / J.M. Fritsch-Yelle, U.A. Leuenberger, D.S. D'Aunno [et al.] // American Journal of Cardiology. – 1998. – № 81. – P. 1391-1392.

13. Meck J.V. Marked exacerbation of orthostatic intolerance after long- vs. short-duration spaceflight in veteran astronauts / J.V. Meck, C.J. Reyes, S.A. Perez [et al.] // Psychosomatic Medicine. – 2001. – № 63. – P. 865-873.

14. Vico L. Effects of long-term microgravity exposure on cancellous and cortical weight-bearing bones of cosmonauts / L. Vico, P. Collet, A. Guignandon [et al.] // *Lancet*. – 2000. – № 355. – P. 1607-1611.

15. Lujan B.F. Human Physiology in Space. Teacher's Manual. A Curriculum Supplement for Secondary Schools / B.F. Lujan, R.J. White. – Houston, TX: Universities Space Research Association, 1994.

16. Palinkas L.A. Predictors of behavior and performance in extreme environments: The Antarctic Space Analogue Program / L.A. Palinkas, E.K.E. Gunderson, A.W. Holland [et al.] // Aviation, Space and Environmental Medicine. 2000. – № 71. – P. 619-625.

17. Campbell A.E. Multi-cultural dynamics in space stations. The 36th International Astronautical Congress / A.E. Campbell. – Stockholm, Sweden. 1985.

18. Cermakian N. Circadian clocks and inflammation: reciprocal regulation and shared mediators / N. Cermakian, S. Westfall, S. Kiessling // *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*. – 2014. – № 62. – P. 303-318.

19. Borbely A.A. Sleep homeostasis and models of sleep regulation / A.A. Borbely, P. Achermann // *Journal of Biological Rhythms*. – 1999. – № 14. – P. 559-570.

20. Czeisler C.A. Stability, precision and the near 24-hr period of the human circadian pacemaker / C.A. Czeisler, J.F. Duffy, T.L. Shanahan [et al.] // *Science*. – 1999. – № 284. – P. 2177-2181.

21. Gundel A. The alteration of human sleep and circadian rhythms during spaceflight / A. Gundel, V.V. Polyakov, J. Zulley // *Journal of Sleep Research*. – 1997. – № 6. – P. 1-8.

22. Manzey D. Behavioral aspects of human adaptation to space – analyses of cognitive performance in space during an 8-day mission / D. Manzey, B. Lorenz, A. Schiewe // *Clinical Investigations*. – 1993. – № 71. – P. 725-731.

23. Fowler B. Summary of research issues in monitoring of mental and perceptual-motor performance and stress in space / B. Fowler, D. Manzey // *Aviation, Space and Environmental Medicine*. – 2000. – № 71(9, Suppl.). – P. 76-77.

24. Davis J.R., Vanderploeg J.M., Santy P.A., Jennings R.T., Stewart D.F. Space motion sickness during 24 flights of the Space Shuttle / J.R. Davis, J.M. Vanderploeg, P.A. Santy [et al.] // *Aviation Space and Environmental Medicine*. – 1988. – № 59: – P. 1185-1189.

25. Mikheeva I. Influence of a 30-day spaceflight on the structure of motoneurons of the trochlear nerve nucleus in mice / I. Mikheeva, G. Mikhailova, R. Shtanchaev [et al.] // *Brain Research*. – 2021. – № 1758. – P. 147331.

26. Князькова И.И. Клиническая фармакология бисфосфонатов / Князькова И.И. // *Фармакотерапия*. – 2014. – № 5-6 (181-182). – С. 84-89.

Учебное издание

*Инюшкин Алексей Николаевич,
Инюшкина Елена Михайловна,
Инюшкин Андрей Алексеевич*

ОСНОВЫ КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

Учебное пособие

Редакционно-издательская обработка
издательства Самарского университета

Подписано в печать 31.05.2024. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печ. л. 10,75.

Тираж 27 экз. Заказ № . Арт. – 11(Р1УП)/2024.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

