

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Сенаторова Наталья Андреевна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ
К ОЦЕНКЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ ОРГАНИЗМА
ЧЕЛОВЕКА В КОСМИЧЕСКИХ ПОЛЁТАХ**

3.3.7 Авиационная, космическая и морская медицина

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата медицинских наук

Научный руководитель:
Фомина Елена Валентиновна,
член-корреспондент РАН,
доктор биологических наук, профессор

Москва 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ	стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1.....	14
ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	14
1.1 Влияние сниженного уровня двигательной активности на функции организма человека.....	14
1.2 Современная система профилактики гипогравитационных нарушений и история ее развития.....	25
1.3 Методы оценки изменений энергообеспечения мышечной деятельности в условиях невесомости как способ оценки величины функциональных резервов..	33
1.3.1 Выбор протокола нагрузочного тестирования на бегущей дорожке	33
1.3.2 Пульсовые методы определения работоспособности и риск сердечно-сосудистой патологии в космическом полете	37
1.3.3 Метод интерференционной поверхностной электромиографии	41
1.3.3.1 Амплитуда поверхностной электромиограммы.....	43
1.3.3.2 Спектральный анализ поверхностной электромиограммы.....	44
1.3.3.4 Нелинейный метод анализа поверхностной электромиограммы.....	45
1.3.3.5 Поверхностная электромиография в условиях невесомости.....	48
ГЛАВА 2.....	53
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	53
ГЛАВА 3.....	67
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	67
3.1 Новые подходы к мониторингу состояния систем вегетативного обеспечения мышечной деятельности в условиях орбитального полета.....	67
3.1.1 Изменение уровня функциональных резервов в ходе длительного космического полета по результатам теста МО-3.....	67

3.1.2 Динамика функциональных резервов космонавтов по результатам теста «Индивидуальные стратегии»	72
3.1.2.1 Динамика уровня функциональных резервов космонавтов по результатам теста «Индивидуальные стратегии» в периоде реадаптации к условиям Земли	83
3.1.2.1 Динамика функциональных резервов в годовом полете по результатам тестов МО-3 и «Индивидуальные стратегии»	86
3.2 Линейный и нелинейный анализы сигнала поверхностной электромиографии m.soleus как метод «цифровой биопсии»	93
3.3. Информативность теста «Индивидуальные стратегии» для совершенствования методов оценки уровня функциональных резервов организма человека	95
ГЛАВА 4.....	100
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	100
ВЫВОДЫ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ОПУБЛИКОВАННЫЕ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В соответствии с планами по освоению космического пространства, в недалеком будущем состоятся полеты человека за пределы низкой околоземной орбиты. Перспектива освоения дальнего космоса определяет необходимость модификации принципов и методов профилактики негативного влияния невесомости на организм человека. Как известно, пребывание человека в условиях невесомости приводит к изменениям практически во всех системах организма (Kandarpa et al., 2019, Stepanek et al., 2019, Taddeo et al., 2019, Gallo et al., 2020, Grigor'ev et al., 2021, Tays et al., 2021). В сердечно-сосудистой системе наблюдаются перераспределение крови в краниальном направлении, смещение жидкости из внутри- во внесосудистое пространство (Norsk, 2020, Vernice et al., 2020), увеличение ударного объема и сердечного выброса в совокупности со снижением систолического, диастолического и среднего артериального давления (Norsk et al., 2015, Gallo et al., 2020, Scott et al., 2022, Vernice et al., 2020). В системе дыхания вследствие гиперволемии легких происходит снижение вентиляционно-перфузионного отношения, исчезает градиент гидростатического давления между основанием и верхушками легких, возникает детренированность дыхательных мышц (Баранов, 2006, Prisk, 2019). Снижение максимального потребления кислорода (МПК) на протяжении космической миссии связано с изменением функций кардиореспираторной системы, уменьшением доли мышечных волокон с окислительным механизмом энергообеспечения и соответствующими метаболическими перестройками. В частности, в ходе длительных полетов на МКС зарегистрировано снижение МПК на 17% в течение первых двух недель полета, далее наблюдалась тенденция к увеличению этого показателя, но он не возвращался к предполетному уровню на протяжении миссии, а в течение 48 часов после полета оставался снижен на 15% (Moore et al., 2014, Young, Sutton, 2021). В системе крови наблюдается синдром эритроцитопении, сопровождающий уменьшение объема плазмы крови, что

приводит к снижению кислородно-транспортных функций крови (Поляков и др., 1998, Trudel et al., 2022). Данные космических полетов и модельных исследований в совокупности свидетельствуют о том, что осевая разгрузка способствует снижению интенсивности опорной афферентации, что впоследствии приводит к атонии и атрофии мышечных волокон (Shenkman, Kozlovskaya, 2019, Comfort et al., 2021, Qaisar et al., 2020). Эти явления ведут к адаптационным перестройкам физиологических систем и к уменьшению функциональных резервов организма, одним из проявлений которых является двигательный гипогравитационный синдром, характеризующийся атонией, атрофией, снижением выносливости и силового потенциала мышц (Козловская, 2017, Juhl IV et al., 2021). В результате изменений регуляторных механизмов работы двигательной системы наблюдаются нарушения установки вертикальной позы, локомоций и снижение ортостатической устойчивости (Macauley et al., 2021). Поскольку раздражение проприоцептивного и тактильного входов необходимо для осуществления постурального контроля, профилактика негативных изменений в системах, обеспечивающих удержание вертикальной позы и равновесия во время бега в условиях космического полета, может улучшить выполнение функциональных задач после полета (Козловская и др., 2010, Macauley et al., 2021, Taes et al., 2021).

Планирование межпланетных миссий делает актуальным поиск индикаторов, отражающих состояние функциональных резервов организма человека в ходе адаптации к условиям невесомости. По определению Р. М. Баевского, под функциональными резервами понимают «информационные, энергетические, метаболические ресурсы организма, обеспечивающие его конкретные адаптационные возможности. Для того, чтобы мобилизовать эти ресурсы при изменении условий окружающей среды, необходимо определенное напряжение регуляторных систем. Именно степень напряжения регуляторных систем, необходимая для сохранения гомеостаза, определяет текущее функциональное состояние человека» (Баевский, 2005). Развитие методологии диагностики уровня функциональных резервов организма, а также функциональных состояний, пограничных между здоровьем и болезнью, является

важнейшим научным направлением клинической физиологии, космической медицины, восстановительной медицины, основанным на современных представлениях о гомеостазе, адаптации, теории функциональных систем и механизмах регуляции жизнедеятельности человека (Соколов и др., 2015, Ванюшин и др., 2022). Проблема разработки методов донозологической диагностики и критериев развития риска заболевания остается актуальной для развития превентивной медицины (Баевский, 1979, Маталыгина, 2020, Ванюшин и др., 2021).

В условиях невесомости снижается уровень энергообеспечения мышечной деятельности для поддержания позы и перемещения тела, поэтому существует потребность в неинвазивной, простой в применении и достаточно информативной методике оценки состояния скелетных мышц в условиях длительного космического полета. Сигнал поверхностной электромиограммы (пЭМГ), регистрируемый во время мышечного сокращения, связан с нейронным импульсом от центральной нервной системы к скелетным мышцам (Farina, Negro, 2012) и способен выявлять информацию об активности мотонейронов, сенсорных входов и режиме работы двигательных единиц. В последние годы было показано, что нервно-мышечная активность может быть охарактеризована такими нелинейными параметрами, как энтропия, коэффициент эксцесса и др. наряду с традиционными линейными параметрами (амплитуда и частота) (Felici, и др., 2001; Vromans, Faghri, 2017).

Наиболее ярко способность к включению функциональных резервов и глубина перестроек, сопровождающих адаптацию к невесомости, проявляется при выполнении тестовых физических нагрузок. Сердечно-сосудистая система играет интегративную роль в процессах адаптации к условиям невесомости (Парин и др., 1967, Vernice et al., 2020, Norsk, 2020, Jirak et al., 2022, Scott et al., 2022, Luchitskaya, Funtova, 2023, Popova, Rusanov, 2023). В настоящее время существует батарея тестов, принятая в российской системе медицинского обеспечения космических полетов, разработанная в соответствии с предшествующим уровнем знаний и технологий в области космической медицины. Однако расширение

знаний гравитационной физиологии и модернизация средств физической профилактики требует разработки современных тестовых процедур, соответствующих новым задачам программы освоения дальнего космоса.

Степень разработанности темы исследования

Российские ученые имеют уникальную возможность использовать Международную космическую станцию в качестве научной лаборатории для изучения фундаментальных закономерностей функционирования систем в условиях реальной невесомости (Фомина и др., 2020). Мировое сообщество ученых продолжает интенсивно изучать закономерности функционирования гравизависимых систем (Shelhamer et al., 2020; Shen et al., 2019; Norsk et al., 2020; Ахре et al., 2020). Выполнение локомоторной физической нагрузки в качестве воздействия, предполагающего оценку ответа гравитационно-зависимых систем, является специфическим тестом для российской школы гравитационной физиологии (Козловская и др., 2013). В отличие от зарубежных ученых, изучающих возможность включения функциональных резервов гравизависимых систем в тестах на велоэргометре (Moore et al., 2014), мы предполагаем, что локомоторный тест является более информативным. С одной стороны, выполнение локомоций на бегущей дорожке вовлекает в работу позную мускулатуру, что выдвигает, в отличие от теста на велоэргометре, более высокие требования к системам вегетативного обеспечения мышечной деятельности и, соответственно, более объективно отражает изменения в гравизависимых системах. С другой стороны, задачи освоения дальнего космоса в соответствии с современными сценариями межпланетных миссий позволяют предположить, что локомоции точнее моделируют задачи напланетной деятельности, чем перемещение на велосипеде.

На современном этапе развития знаний о закономерностях функционирования сердечно-сосудистой системы в условиях невесомости возникает необходимость использования стандартного локомоторного теста и показателя суммарной пульсовой стоимости, или «пульсовой суммы». Численно

пульсовая сумма равна площади под кривой ЧСС и находится путем интегрирования всей суммы ЧСС за тренировку (Brodan, 1967; Engelen et al., 1986; Волков и др., 2003). Эти методы оценки в настоящее время применяются в спортивной физиологии, планируется использовать этот показатель и в гравитационной физиологии для нормирования физических нагрузок и оптимизации тренировочного процесса во время и после длительного космического полета.

Регистрации электромиографической активности мышц человека в условиях космического полета посвящены единичные работы (McCall et al., 2003; Edherton et al., 2006). В клинической практике и экспериментальных работах для изучения активности скелетных мышц используется интерференционная электромиография (иЭМГ), обычно это анализ линейных параметров ЭМГ. Однако запись иЭМГ можно интерпретировать как нелинейный процесс, обладающий свойством детерминистического хаоса (Nieminen et al., 1996). Имеются сведения о том, что нелинейные параметры иЭМГ позволяют выявлять состояние утомления скелетных мышц, в том числе состояния с повышенной синхронизацией двигательных единиц (Мейгал, 2016; Goldberger et al., 2002; Del Santo et al., 2007; Liu Y. et al., 2004, Fattorini et al., 2005; Felici et al., 2001).

Цель работы

Целью исследования является экспериментальное обоснование новых подходов к оценке функциональных резервов организма человека в космических полётах.

Задачи

1. Определить информативность параметров нового локомоторного теста для диагностики уровня функциональных резервов организма в длительных космических полетах.
2. Выполнить сравнительный анализ динамики изменений способности к включению функциональных резервов организма в ответ на физическую нагрузку во время и после сверхдлительного и длительных космических полетов.

3. Описать индикаторы изменений функционального резерва нервно-мышечной системы на основе перестроек сигнала пЭМГ m.soleus при выполнении локомоторной физической нагрузки в ходе длительного космического полета.

Научная новизна

Впервые предложены предикторы уровня функциональных резервов человека на основе физиологических параметров, регистрируемых в локомоторном тесте на всех этапах космического полета. Космонавтами на всех этапах космического полета был выполнен новый протокол стандартного локомоторного теста, который позволяет определить уровень функциональных резервов организма. Предложены показатели пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления, обеспечивающие прогнозирование в стандартном локомоторном тесте уровня функциональных резервов организма на раннем этапе реадаптации к условиям Земли. Оценка динамики уровня функциональных резервов организма в годовом полете выполнена с помощью новых методик. В работе впервые экспериментально подтверждена возможность использования одного из нелинейных параметров сигнала поверхностной электромиограммы гравизависимой m.soleus в локомоторном тесте в длительном космическом полете, что ранее не применялось в области гравитационной физиологии. Представленные в работе результаты позволят усовершенствовать систему мониторинга уровня функциональных резервов человека с целью определения необходимости коррекции профилактических мероприятий в условиях длительного космического полета.

Положения, выносимые на защиту

1. Способность космонавта к включению функциональных резервов организма после длительного космического полета можно прогнозировать на основе новых для космической медицины показателей — пульсовой суммы работы и пульсовой суммы

восстановления в стандартном тесте на бегущей дорожке на заключительном этапе миссии.

2. Комплекс физических тренировок на основе принципов российской системы профилактики гипогравитационных нарушений обеспечивает защиту космонавта от неблагоприятного действия невесомости, достаточную для выполнения бега с высокой скоростью на 9-е сутки после годовой космической миссии.
3. Оценка сложности и регулярности сигнала поверхностной электромиограммы выявляет изменения функционального состояния *m.soleus* при длительном пребывании человека в условиях невесомости и может рассматриваться как неинвазивная методика мониторинга для медицинского обеспечения перспективных космических миссий.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в описании закономерностей включения функциональных резервов организма космонавтов в ответ на физическую нагрузку в космических полетах различной длительности и на раннем этапе реадаптации к условиям Земли. Впервые описаны электромиографические перестройки *m.soleus*, обусловленные длительным пребыванием в условиях невесомости на основе использования нелинейного параметра энтропии.

Практические результаты работы могут быть востребованы при разработке системы медицинского обеспечения полетов в дальний космос. Кроме этого, результаты работы могут быть интересны для спортивной медицины и реабилитации пациентов после пребывания в условиях длительной гиподинамии. Полученные материалы составляют обширную базу данных, в целом свидетельствуя об индивидуальном характере адаптационных реакций космонавтов в ответ на нагрузочное тестирование и о необходимости развития персонализированной и комплексной оценки функциональных резервов

организма космонавтов на разных этапах космического полета. В работе проведено сопоставление параметров локомоторных тестов, которые выполнялись на всех этапах космического полета, выявлена информативность нового локомоторного теста. В результате работы получены уникальные данные, которые открывают перспективы дальнейших исследований в интересах пилотируемых космических полетов.

Методология исследования

В диссертационной работе применена методологическая основа в составе общенаучных методов теоретического и эмпирического познания: формирование гипотезы исследования, проведение эксперимента, анализ полученных данных, синтез, обобщение. Теоретической базой представленного исследования являются теория функциональных систем (П. К. Анохин и др.), теория функциональных резервов организма (Л. А. Орбели, О. Г. Газенко, Р. М. Баевский и др.). Для решения задач диссертационной работы были использованы традиционные подходы к организации экспериментальных исследований, принятые в авиационной, космической и морской медицине. Основой для формирования методов исследования явилось применение косвенных методов оценки функциональных резервов организма на основании исследования состояния функциональных систем организма как в обычных (в состоянии покоя) условиях жизнедеятельности в условиях земной гравитации и в условиях невесомости, так и при проведении функциональных нагрузочных проб. В программу исследований включены методики, валидность которых подтверждена в работах отечественных и иностранных исследователей и учёных: оценка физической работоспособности в локомоторном тесте МО-3 на основе показателя «физиологическая стоимость нагрузки» (Kozlovskaya, Grigoriev, 2004) и модификация этого показателя — «физиологическая нагрузка». В стандартном локомоторном тесте использовались такие методы, как эргоспирометрия, электрокардиография, определение концентрации лактата в капиллярной крови. Рассчитывались такие показатели, как пульсовая сумма работы и восстановления,

пульсовая сумма покоя, пульсовой долг (Brodan, 1967, Engelen et al., 1996, Kozlov et al., 2022, Волков и др., 2003), ДЧСС (Picano et al., 2020, Ciampi et al., 2021), метаболический эквивалент (MET) (Jetté et al., 1990), аэробно-анаэробный порог (Wasserman et al., 1987). В локомоторном тесте со ступенчато-возрастающей нагрузкой изучался сигнал поверхностной электромиограммы с расчетом линейных параметров и энтропии (Singh et al., 2019, Beretta-Piccoli et al., 2023, Khodadadi et al., 2023).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается наличием критериев включения–исключения субъектов исследования, позволяющих сформировать репрезентативную выборку. Критериями включения участников в эксперимент были: мужской пол, длительный космический полет (около 6 месяцев). Критерии исключения: неполное или несвоевременное выполнение сессий эксперимента, а также значительные различия в применении схем профилактики негативного воздействия невесомости в ходе космического полета. Достоверность результатов работы подтверждается достаточным количеством анализируемых данных, применением современных и традиционных методов исследования, соответствующих поставленной цели и решаемым задачам. Диссертационная работа является частью многолетнего экспериментального исследования в условиях МКС, дизайн и подбор методик которой были одобрены решением Секции «Авиационная, космическая и морская медицина» Учёного совета Института медико-биологических проблем. Положения, выносимые на защиту, выводы и практические рекомендации подкреплены фактическими данными, представленными в виде таблиц и рисунков. Обработка, обобщение и статистический анализ полученных результатов проведены с помощью современных средств и методов анализа данных.

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих российских и международных конференциях: XIV Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» (Звездный городок, 2021), XXIII Международный симпозиум «Человек в космосе» (Human in Space Symposium) (Москва, 2021), 41-ый Ежегодный международный симпозиум по гравитационной физиологии (2021), XLVI Академические чтения по космонавтике им. С. П. Королёва (Москва, 2022), IX Российская конференция с международным участием по управлению движением, посвященной 95-летию со дня рождения И. Б. Козловской (Казань, 2022), 74-й Международный астронавтический конгресс (IAC 2023), XX Конференция молодых учёных, специалистов и студентов с международным участием, посвященная 165-летию со дня рождения К. Э. Циолковского (Москва, 2023), XV Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции «Функциональная диагностика – 2023» (Красногорск, 2023), XXIV Съезд физиологического общества им. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, 2023), 43rd Annual the International Society of Gravitational Physiology Meeting (2024), XIIth IAA Symposium on Future Space Exploration (Турин, 2025). Результаты работы опубликованы в 20 научных трудах, из них в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus (7 статей), а также в сборниках докладов научных конференций (13 тезисов).

Личный вклад автора

Автор принимала непосредственное участие в сопровождении и проведении сеансов космического научного эксперимента «Профилактика-2», проводила сбор, анализ, статистическую обработку полученных данных, подготовила тезисы и статьи по полученным результатам исследования, представляла результаты работы на российских и международных научных конференциях.

ГЛАВА 1

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Влияние сниженного уровня двигательной активности на функции организма человека

С начала космических полетов (КП) с участием человека прошло уже более 60 лет, и за это время накопилось довольно большое количество медико-биологических данных, позволивших мировому научному сообществу обеспечивать безопасное для жизни пребывание человека в условиях невесомости. Гравитационно-обусловленные изменения физиологических механизмов проявляются, в частности, в перестройке функций двигательной и сердечно-сосудистой систем. Важно отметить, что развитие двигательной системы человека в фило- и онтогенезе происходит в условиях гравитационного поля Земли, и организация ее работы обеспечивает точные, устойчивые, координированные движения. В свою очередь, отсутствие фактора гравитации значительно изменяет протекание физиологических процессов в ответ на отсутствие необходимости преодолевать действие силы тяжести.

С середины 1970-х годов было признано, что космический полет вызывает значительную атрофию мышц млекопитающих, особенно мышц, которые играют постуральную роль в условиях Земли. В большом количестве космических и наземных экспериментов, моделирующих условия невесомости, изучались особенности изменений мышц спины и конечностей, разнообразными методами сопоставлялась физиологическая роль тонической и фазной мускулатуры в организации движений. Композиция мышц, то есть доля быстрых и медленных волокон, генетически предопределена, но в процессе онтогенеза может претерпевать значительные перестройки в результате адаптации к специфическим физическим нагрузкам (Plotkin et al., 2021). Из них *m.soleus* является позной, и обычно на 70-90% она состоит из медленных мышечных волокон (МВ) (Delp, Duan, 1996), а *m.vastus lateralis* и *m.tibialis anterior* относят к фазной мускулатуре,

и, в свою очередь, *m.gastrocnemius* представляет собой смешанный тип: по разным оценкам, она на 40-50% состоит из медленных мышечных волокон.

Большой вклад в понимание природы и раскрытие физиологических механизмов эффектов невесомости внесли результаты наземных модельных исследований, таких как сухая иммерсия (СИ) и антиортостатическая гипокинезия (АНОГ). Все средства и методы профилактики гипогравитационных нарушений сначала отрабатывались в модельных экспериментах и лишь затем использовались в КП. Этот принцип обязательно соблюдается в российской системе профилактики и в настоящее время.

Сухая иммерсия (СИ) представляет собой экспериментальную модель, в рамках которой изучается эффект гравитационной разгрузки. Методическая основа этой модели основана на принципе «сухого» погружения испытуемого в водную среду, создаваемую специальной водонепроницаемой и высокоэластичной тканью (Шульженко, Виль-Вильямс, 1976). В положении лежа испытуемый укладывается на гидроизолирующую ткань и погружается в иммерсионную среду до уровня шеи. В гравитационной физиологии СИ является более предпочтительной моделью для исследований, так как изменения характеристик сердечно-сосудистой, двигательной и других систем человека в ней подобны наблюдаемым в коротких космических полетах. Основной акцент исследований направлен на изучение модификаций работы систем организма, способных представлять опасность для здоровья или работоспособности человека, и возможности их профилактики (Шульженко, Виль-Вильямс, 1975). Результаты исследований в СИ разной продолжительности показали изменения в мышцах, схожие с результатами, полученными в кратковременных космических полетах. Установлено, что происходящее в условиях невесомости снижение опорной афферентации приводит к инаktivации рекрутирования медленных двигательных единиц, что, в свою очередь, приводит к последующей атонии и атрофии мышечных волокон, экспрессирующих медленную изоформу тяжелой цепи миозина. Мышечные волокна теряют значительную часть молекул цитоскелета (Litvinova et al., 2004, Shenkman et al., 2004) и впоследствии

способность к эффективному функционированию актомиозинового комплекса (Litvinova et al., 2004, Ogneva et al., 2011). Эти изменения приводят к снижению чувствительности к кальцию и более низкому диапазону максимального напряжения при кальций-индуцированном сокращении МВ. Максимальная сила, которую может генерировать мышечное волокно, в значительной степени зависит от количества саркомеров, функционирующих параллельно (т. е. от площади поперечного сечения мышцы). В этом контексте изучалось влияние условий невесомости на площадь поперечного сечения мышц, определяемое различными методами измерения объема. После трех дней СИ наблюдалось снижение площади поперечного сечения в мышечных волокнах I типа *m.vastus lateralis* на 7,5%, а в мышечных волокнах II типа — на 8,9%. После семи дней СИ снижение площади поперечного сечения мышечных волокон I типа *m.vastus lateralis* составило 17,3%, а мышечных волокон II типа — 15,3% (Shenkman, Kozlovskaya, 2019). При сравнении с данными, полученными в коротких космических полетах, установлено, что диапазоны изменений площади поперечного сечения при воздействии СИ и в космическом полете различаются незначительно. Атрофические изменения в медленных и быстро сокращающихся типах мышечных волокон также существенно не различаются как в условиях невесомости, так и при сухой иммерсии. После 7-дневной СИ наблюдалось снижение площади поперечного сечения мышечных волокон I типа *m.soleus* в среднем на 24%, в то время как существенных изменений в площади поперечного сечения мышечных волокон II типа *m.soleus* не происходило (Shenkman, Kozlovskaya, 2019). Результаты изокинетического тестирования, выполненного на первые сутки после 21-суточной СИ, демонстрируют снижение силы мышц голени. При этом наиболее выраженное снижение силы наблюдалось при подошвенном сгибании стопы в изометрическом режиме и на скорости 60 °/с. Также наблюдалось снижение максимальных моментов сил флексоров и экстензоров бедра, более выраженное на угловой скорости 60 °/с, а также снижение силовой выносливости мышц флексоров бедра (Кукоба и др., 2020). Что касается изменения физической работоспособности, то было показано, что после

пребывания в условиях 21-суточной СИ у испытуемых происходило снижение пульсовой суммы работы во время выполнения теста «Индивидуальные стратегии» (ТИС), включающего ступенчато-возрастающую нагрузку в течение восстановительного периода после выполнения теста на 7-е сутки после завершения СИ. Полученные результаты свидетельствуют о снижении после пребывания в условиях сухой иммерсии функциональных резервов систем, обеспечивающих физическую работоспособность человека. В этом исследовании была показана возможность отслеживать динамику восстановления уровня функциональных резервов после СИ.

Часть информации о функции мышц в условиях опорной разгрузки у человека была получена в результате наземного моделирования эффектов пребывания в невесомости на модели антиортостатической гипокинезии (АНОГ), при которой испытуемые соблюдают постельный режим в положении с наклоном вниз головного конца кровати на 6-9°. Исследования в АНОГ продолжительностью 42 дня показывают, что силовые свойства мышц-разгибателей голени снижаются примерно на 25%. LeBlanc и соавт. (1992) обнаружили, что максимальная произвольная сила (МПС) снизилась на 30% в мышцах-разгибателях голени и на 18% — в подошвенных сгибателях. Что касается оценки изменений мышечной массы, то наиболее распространенными методами были магнитно-резонансная томография и ультразвуковое исследование. Также в ряде исследований (Kawakami et al., 2000) сообщалось об уменьшении объема мышц-разгибателей бедра и голени в диапазоне от 6% до 11% через 20 дней АНОГ, тогда как LeBlanc и соавт. обнаружили, что 120 дней АНОГ привели к уменьшению объема мышц бедра на 15% (LeBlanc и соавт., 1992). Это свидетельствует о том, что гипотрофия мышц может произойти в относительно ранние периоды АНОГ. Площадь поперечного сечения медленных мышечных волокон *m.soleus* у испытуемых мужского пола уменьшалась с 7% до 29% после 60 дней АНОГ и с 35% до 48% после 120-дневного периода (Shenkman et al., 1998). Таким образом, АНОГ способствует снижению нагрузки на постуральные антигравитационные скелетные мышцы наряду со значительным

снижением их активности и энергозатрат. Однако нужно отметить, что в исследованиях АНОГ не происходит полного нивелирования опорной афферентации (Young, Sutton, 2021).

В условиях космического полета позная мускулатура человека атрофируется сильнее, чем фазная. Разгрузка мышц связана с характерной атрофией антигравитационной мускулатуры, которая богата медленно сокращающимися волокнами I типа. Так, у членов экипажа, вернувшихся с Международной космической станции (МКС) и станции «Мир», мышечная атрофия была более выражена в *m.soleus*, чем в *m.quadriceps femoris* и *m.gastrocnemius*, которые имеют смешанный тип состава мышечных волокон (Qaisar et al., 2020). Показано, что мышечные волокна I типа подвергаются большей атрофии, чем мышечные волокна II типа, а волокна мышц-разгибателей поражаются сильнее, чем волокна сгибателей (Fitts et al., 2000). К тому же в условиях невесомости увеличивается восприимчивость скелетных мышц к повреждениям, при этом фактические повреждения возникают во время перегрузок после полета.

Как отмечалось после серии полетов американской станции «Скайлэб», продолжавшихся 28, 56 и 84 дня в условиях невесомости, у космонавтов наблюдалось снижение производительности и размера скелетных мышц. В частности, сила сгибателей голени, измеренная через 5 дней после приземления, снизилась примерно на 20% после 28- и 56-дневных полетов, но осталась неизменной после 84-дневной миссии (Greenleaf et al., 1989). Кроме того, результаты 140- и 175-дневных космических полетов на станцию «Мир» показали значительное снижение силы *m.gastrocnemius*, особенно при работе в изометрическом режиме (Kozlovskaya et al., 1981). В серии полугодовых миссий на станцию «Мир» обнаружено, что изометрическая максимальная произвольная сила *m.gastrocnemius* и *m.soleus* уменьшилась на 42%, а пиковая сила уменьшилась на 25% (Koryak, 2001). Результаты, полученные при обследовании 19 членов экипажа космической миссии, находившихся в космическом полете 11 дней, показали, что максимальная произвольная сила разгибателей голени

снизилась на 10% (Greenisen, 1994). В отличие от этих отчетов, в 17-дневной миссии у четырех членов экипажа не наблюдалось снижения силы *m.gastrocnemius* (Narici et al., 1997). Этот факт следует интерпретировать в контексте того, что правила полетов NASA требуют, чтобы все члены экипажа выполняли физические упражнения во время космических полетов продолжительностью более 10 дней.

Результаты, полученные в космическом полете «Скайлэб» продолжительностью 84 дня, показали значительное уменьшение объема голени на 7–10% (Thornton, Rummel, 1977). Напротив, после 140- и 175-дневного полета на космическую станцию «Мир», Козловская с соавт. (1981) обнаружили лишь небольшое временное уменьшение окружности голеней космонавтов и, следовательно, пришли к выводу о том, что у них не было большой потери мышечной массы. Однако LeBlanc и соавт. (2000) обнаружили, что у членов экипажа после 112–196 дней космического полета наблюдалось значительное уменьшение объема мышц голени и бедра (-19% в *m.soleus* и *m.gastrocnemius* и -10% в *m.quadriceps femoris*). Результаты, о которых сообщили LeBlanc и соавт. были получены с помощью метода магнитно-резонансной томографии (МРТ), что позволяет предположить, что различия в результатах могут объясняться методологическими различиями. Следует отметить, что экипажи в различных космических миссиях выполняли разные виды и объемы физической активности, включая упражнения, предназначенные для противодействия потерям мышечной массы и детренированности. Рассматривая полученные результаты, необходимо также подчеркнуть, что, как и при измерении силы, так и размера всей мышцы, определение размера мышечных волокон производилось с использованием ряда различных методик, включая гистохимические срезы и анализ отдельных волокон. Edgerton и соавт. (1995) обнаружили, что размер всех типов мышечных волокон *m.vastus lateralis* уменьшался после 5–11 дней космического полета (т.е. тип I ~16%; IIa - 23%; и IIb - 36%). Widrick и соавт. сообщили об аналогичных результатах для *m.soleus*, в которой после 17-дневного космического полета поперечное сечение волокна IIa типа снизилось на 26% по сравнению с 15%

снижением в медленных волокнах I типа. Атрофия, возникающая после космического полета, стала особенно очевидна, когда миофибриллы анализировались с помощью электронного микроскопа (Riley et al., 2000, Widrick et al., 1999). Послеполетная атрофия волокон m.soleus I типа отражалась в уменьшении длины Z-диска саркомеров на 39% по сравнению с предполетными срезами. Однако это исследование также продемонстрировало значительную индивидуальную вариабельность среди испытуемых. Уменьшение диаметра медленного волокна I типа m.soleus у четырех членов экипажа составляло от 2 до 19%.

Как уже известно, наиболее важным структурным изменением после космического полета является атрофия медленных волокон, и, как следствие, снижение силы с наибольшими потерями в m.soleus, которая в среднем составляла 20%. С одной стороны, атрофия мышечных волокон I типа m.soleus являлась одной из причин потери максимальной силы, которая снизилась на 35%. Процентное уменьшение диаметра волокна m.soleus прямо пропорционально коррелировало с первоначальным размером волокна перед полетом и было обратно пропорционально продолжительности физических тренировок на бегущей дорожке. Уменьшение диаметра было связано с увеличением плотности волокон. Последнее коррелировало и с уменьшенной максимальной скоростью сокращения волокна, и, вероятно, это способствовало снижению скорости сокращения мышечных волокон I типа m.soleus и m.gastrocnemius на 21 и 18% соответственно. Максимальная мощность сокращения мышечного волокна была снижена во всех типах волокон с наибольшими потерями в m.gastrocnemius. С другой стороны, после 17-дневной космической миссии, Trappe и соавт. (2001) обнаружили, что размер отдельных мышечных волокон m.soleus и m.gastrocnemius четырех членов экипажа астронавтов не изменился. Обобщение результатов обследования членов экипажей «Shuttle» и МКС затруднительно из-за очевидной разницы в продолжительности и условиях воздействия условий невесомости. Кроме того, в некоторых из исследований участвовали астронавты и космонавты, совершившие 90-дневные и даже более длительные полеты с

выполнением значительного количества физических упражнений в полете (Shenkman, Kozlovskaya, 2019, Moosavi et al., 2021, Young, Sutton, 2021).

Таким образом, снижение мышечной силы сопровождается и уменьшением размера мышц в целом. Эти данные указывают на то, что скелетные мышцы человека теряют силу и объем в результате как коротких, так и длительных космических полетов. Наблюдавшийся комплекс изменений со стороны основных физиологических систем в послеполетном периоде был значительно более выражен, чем во время полета. Все это свидетельствует о том, что длительное пребывание в состоянии невесомости сопровождается значительным снижением функциональных резервов нервно-мышечной системы.

Во время космического полета сердечно-сосудистая система человека претерпевает значительные изменения, также связанные с воздействием отсутствия силы тяжести. Сразу после прекращения воздействия силы тяжести происходит перераспределение крови в краниальном направлении, вследствие этого активируются эндокринные механизмы, которые ведут к снижению объема циркулирующей крови. При этом увеличиваются объемы венозного возврата и сердечного выброса, оказывая влияние на активность вегетативной и эндокринной систем (Norsk, 2020). Кроме этого, у космонавтов и астронавтов зарегистрировано снижение систолического, диастолического и среднего артериального давления (Norsk et al., 2015).

Наиболее прогностически сложным синдромом является ортостатическая неустойчивость, которая в разной степени возникает после космического полета, когда многие космонавты испытывают симптомы, связанные со снижением артериального давления и компенсаторной тахикардией (Buckey Jr et al., 1996). Ортостатическая неустойчивость, наряду с изменениями артериального давления, является ключевым фактором, определяющим изменения в сердечно-сосудистой системе (Fedorowski et al., 2019), вероятно, из-за повышенной активности симпатического отдела нервной системы и нарушения насосной функции сердца. Тем не менее, интенсивные физические тренировки в полете, а также профилактический прием водно-солевых добавок в день посадки помогают

снизить степень проявления ортостатической неустойчивости (Козловская и др., 2015, Fu et al., 2019).

В условиях невесомости снижение метаболических потребностей и уровня потребления кислорода приводит к атрофии миокарда (Summers et al., 2005) как в условиях невесомости, так и при ее моделировании (Perhonen et al., 2001). В работе (Perhonen et al., 2001) было показано, что масса левого желудочка астронавтов уменьшилась на 9,1% при эхокардиографических измерениях по сравнению с предполетными измерениями, но восстановилась до нормы к третьему дню после полета. Полученные результаты позволяют подчеркнуть пластичность сердечной мышцы и рабочую модель физиологической адаптации, однако еще предстоит изучить потенциальные риски необратимых структурных изменений для еще более длительных миссий в дальний космос.

В условиях длительного космического полета изменения затрагивают и сосудистое русло, в частности, изменение показателя жесткости артерий. В ходе длительного космического полета наблюдалось увеличение параметров артериальной жесткости (Hughson et al., 2016, Marshall-Goebel et al., 2019). Имеются данные, указывающие на то, что жесткость сонной артерии практически полностью восстанавливается через четыре дня после возвращения на Землю (Arbeille et al., 2017). Однако при анализе изменений, происходящих в течение полугодового космического полета, неинвазивный показатель уровня жесткости артерий, такой как скорость распространения пульсовой волны, существенно не меняется по сравнению с предполетным уровнем (Лучицкая и др., 2021). Это несоответствие ставит под сомнение быстрое восстановление свойств артерий после полета, и, следовательно, необходимы дополнительные исследования для выяснения механизмов долгосрочного ремоделирования сосудов. Возможно, такие изменения обусловлены различиями в схемах системы профилактики гипогравитационных нарушений.

Имеются данные о снижении функциональных резервов сердечно-сосудистой системы по параметрам вариабельности сердечного ритма (Лучицкая и др., 2021). Регистрируется характерное снижение ЧСС во время полета,

значимое снижение кинетической энергии и в то же время неизменное, сравнимое с предполетными данными, значение средней баллистической силы сердечного сокращения. Этот факт подтверждает ранее сделанный вывод в пользу «экономичности» работы сердца в условиях невесомости.

Среди изменений, связанных с работой сердца в условиях невесомости, имеются отдельные сообщения о регистрации аритмических явлений у космонавтов в покое и при физической нагрузке (Scott et al., 2022). Во время космических миссий на орбитальную станцию «Мир» у большинства космонавтов аритмические явления регистрировались в виде единичных экстрасистол, наиболее часто это случалось при физической или эмоциональной нагрузках, в том числе при выполнении внекорабельной деятельности (Федоров, Голубчикова, 1992, Голубчикова и др., 2001, Григорьев, Баевский, 2007). Во время регистрации экстрасистол не наблюдалось изменений гемодинамических параметров и самочувствие космонавтов, как правило, оставалось удовлетворительным, поэтому изменения ритма часто расценивалось как функциональное явление. Однако имеются некоторые сведения, свидетельствующие о прогностически неблагоприятных для здоровья аритмических явлениях. В частности, аритмия произошла во время полетов «Аполлона», когда у одного астронавта наблюдался 22-тактный узловой бигеминальный ритм, за которым последовал период желудочковой тахикардии (Hoffler, Johnson, 1975). Через 1,5 года у этого астронавта произошел острый инфаркт миокарда. Во время полета «Скайлэба» у всех 9 астронавтов наблюдались те или иные формы нарушения ритма, хотя большинство состояло из единичных желудочковых экстрасистол и были так же клинически незначительными (Johnston, Dietlein, 1974). Однако один астронавт перенес 5 эпизодов желудочковой тахикардии во время тренировок с отрицательным давлением на нижнюю часть тела (ОДНТ), а у другого наблюдались периоды наджелудочковой экстрасистолии во время покоя и после физической нагрузки. Кроме того, сообщалось об одном эпизоде стойкой тахиаритмии во время внекорабельной деятельности, в результате чего продолжительность полета астронавта сократилась с 11 месяцев до 6 месяцев

(Fritsch-Yelle et al., 1998). У одного 49-летнего космонавта через 2 года после кратковременного космического полета был зафиксирован инфаркт миокарда. Пять астронавтов подверглись радиочастотной абляции по поводу предсердных аритмий. Это позволяет предположить, что после космических полетов может быть повышен риск фибрилляции предсердий по сравнению с другими лицами соответствующего возраста. Используя магнитно-резонансную томографию сердца, Хайн и соавт. (Khine et al., 2018) сообщили, что полугодовой космический полет приводил к кратковременному увеличению объема левого предсердия, что, по мнению авторов, в сочетании с высокой ЧСС во время физических нагрузок может привести к повышенному риску фибрилляции предсердий.

Морфология сердца во время пребывания в условиях невесомости также претерпевает изменения. Ультразвуковое исследование в условиях космического корабля является более доступным по сравнению с методами высокого разрешения (МРТ) и было использовано для оценки размеров и массы левого желудочка у астронавтов Skylab. В день приземления у всех астронавтов наблюдалось снижение диастолического размера левого желудочка (-15%), ударного объема (-16%) и массы миокарда (-8%) (Johnston, Dietlein, 1974). Признавая потенциал повышения точности исследования по сравнению с эхокардиографией при оценке массы левого желудочка, Perhonen и соавт. (Perhonen et al., 2001) использовали магнитно-резонансную томографию сердца для оценки массы левого желудочка и сообщили о ее снижении на 12% после 10 дней космического полета. Напротив, предварительные недавние результаты, полученные с помощью МРТ сердца, указывают на отсутствие изменений массы и функции левого желудочка или признаков фиброза миокарда после 4–6 месяцев космического полета (Abdullah et al., 2013). Эти результаты свидетельствуют о том, что в сочетании с технологическими достижениями в оценке морфологии и функции сердца улучшение мер профилактики компенсирует неблагоприятное воздействие длительного космического полета на морфологию и функцию сердца (Scott et al., 2022).

1.2 Современная система профилактики гипогравитационных нарушений и история ее развития

Впервые проба с физической нагрузкой при обследовании космонавтов в невесомости была выполнена на космическом корабле «Восход» (Акулиничев и др., 1963), позднее на кораблях «Джемини» (Berry, 1967). При ее выполнении космонавты фиксировались эластическими тязами к применяемому тренажеру для физической нагрузки. Они должны были выполнять 30 приседаний за 1 мин, удерживая в руках резиновые амортизаторы (с сопротивлением по 25 кг), прикрепленные к станине тренажера. При этом фиксировалась частота сердечных сокращений и дыхания, и считался важным период восстановления после пробы. В течение полета физиологические показатели указывали на значительные отклонения от предполетного уровня в первые дни полета, соответствующие острому периоду адаптации. Послеполетные данные показывали более выраженную реакцию работы сердечно-сосудистой системы на физическую нагрузку.

В первом групповом космическом полете длительностью 5 суток с участием 7 космонавтов было выявлено ухудшение функционального состояния систем транспортировки кислорода и регуляторной способности сердечно-сосудистой системы, а также регуляции вертикальной позы. Тонус и сила антигравитационных мышц после полета были несколько снижены, а также регистрировалось увеличение частоты и амплитуды физиологического тремора. Однако все негативные изменения сохранялись только на протяжении двух суток после посадки (Воробьев и др, 1969).

С появлением на борту космического корабля велотренажера и бегущей дорожки нагрузочные тесты проводились со ступенчато-возрастающей нагрузкой, и оценка уровня функциональных резервов организма стала более объективной, а также увеличивался объем ценных физиологических данных, полученных при обследованиях космонавтов и астронавтов. При этом постепенно изменялись подходы к профилактике негативных влияний невесомости и длительность

космических миссий, что нашло свое отражение в результатах современных космических экспериментов.

Итак, снижение физической работоспособности и мышечной силы в космическом полете стали очевидны даже после кратковременных полетов, поэтому изменялись и подходы в системе профилактики. В 18-суточном полете (1970 г.) использовался трехдневный микроцикл (Воробьев и др., 1970). Два раза в день члены экипажа выполняли комплекс физических упражнений: первый день — скоростно-силовая направленность, второй день — силовая и общая выносливость, третий день — общая выносливость. Во время каждой тренировки нагрузка распределялась равномерно на все мышечные группы с акцентом на использование имитации ходьбы, бега и инерционно-ударных воздействий. В качестве отягощения использовались резиновые амортизаторы и специальный костюм, позволяющий космонавтам удерживаться на площадке, снабженной петлями для крепления амортизаторов. В соответствии с программой, для проведения комплекса физических упражнений в полете отводилось 30 мин (с подготовкой в течение 50–60 мин). После тренировок космонавты отмечали эффект «мышечной радости» и «заряд энергии» на весь рабочий день. Однако в день посадки у космонавтов были выявлены отчетливые изменения со стороны двигательной сферы. Так, например, приблизительно в течение 3 часов после полета им было трудно сохранять вертикальную позу, они предпочитали находиться в положении лежа. Переход из этого положения в вертикальное положение или положение сидя сопровождалось значительным ухудшением самочувствия (проявлялись головокружение, слабость) с заметным учащением частоты сердечных сокращений. У космонавтов появилось ощущение, словно они подвергались воздействию перегрузок величиной 2–2,5G. Интересно, что даже в положении лежа они ощущали «вдавление» в постель. Голова, верхние и нижние конечности и даже внутренние органы, по словам космонавтов, становились необычно тяжелыми, и они ощущали их вес. Такое состояние продолжалось около 2–3 суток. Через сутки после полета походка все еще оставалась неуверенной. Для сохранения вертикальной позы требовались усилия. При объективном

исследовании зарегистрировано выраженное увеличение амплитуды колебаний общего центра тяжести. Изменения статики и локомоторных функций в первые и вторые сутки после полета были настолько значительными, что возникала необходимость страховки при передвижении космонавтов. На 2–5 сутки после полета отмечалось усиление мышечных болей. В противоположность верхним конечностям, тонус мышц нижних конечностей был снижен, и он восстановился только на 11 сутки. Сила кистей не изменилась, а становая сила заметно снизилась. Объемы голени и бедра у обоих космонавтов несколько уменьшились. Уменьшение объемов нижних конечностей и потерю веса исследователи объясняли атрофией мышц, чему соответствовали и результаты биохимических исследований, проведенных после полета и указывающих на нарушение азотистого и калиевого баланса. Отмечалась повышенная рефлекторная возбудимость нервно-мышечного аппарата, асимметрия сухожильных рефлексов — признаки ухудшения функционального состояния нервной системы, вызванные, в первую очередь, грубыми перепадами афферентации, возникающими на разных этапах полета и в период реадаптации к земным условиям (Воробьев, Нефедов, 1970).

Обобщение результатов послеполетного обследования показало, что защитно-приспособительные механизмы не обеспечивают уравнивания взаимоотношений организма и среды. Наблюдавшийся комплекс изменений со стороны основных физиологических систем в послеполетном периоде был значительно более выражен, чем во время полета. Все это свидетельствует о том, что процесс приспособления к обычным условиям земного существования после длительного пребывания в состоянии невесомости, как это и ожидалось, протекает с известными трудностями и требует более выраженного напряжения физиологических систем, чем при адаптации к состоянию невесомости.

В результате проведенных исследований стала очевидна важность системы медицинского обеспечения длительных космических полетов, а именно интенсивных физических тренировок с целью противодействия негативным перестройкам в функционировании гравизависимых физиологических систем в

условиях невесомости (Козловская и др., 2010, Petersen et al., 2016, Macaulay et al., 2021, Rivas et al., 2023, Scott et al., 2023). Для сохранения физической работоспособности и предотвращения негативных изменений в органах и системах в космических полетах произошло усовершенствование системы профилактики (Козловская и др., 2001). Советские ученые оценивали эффективность средств и методов профилактики негативных влияний невесомости и их влияния на физическую работоспособность на добровольцах в 30-суточном АНОГ (Степанцов и др., 1972). Комплексный тренажер (КТФ), который был опробован в этом эксперименте, состоял из бегущей дорожки с электроприводом, обеспечивающим скорость движения ленты до 10 км/ч, тренировочно-нагрузочного костюма (ТНК), спецобуви и притяжной амортизационной системы с нагрузкой до 50 кг. КТФ был предложен в качестве основного средства профилактики (Какурин и др., 1978). Создателями этого комплекта явились А. М. Генин, А. В. Еремин, И. Д. Пестов, В. И. Степанцов. В подготовительной части тренировок осуществлялась ходьба на дорожке обычным шагом, на носках, пятках, наружных и внутренних краях стопы, упражнения типа «потягивания» кистей и стоп, приседания, упражнения на координацию движений и т. д. В основной части выполнялись упражнения с амортизаторами (жим, подтягивание, разгибание рук, приседания, вращения туловища вправо и влево); изометрические упражнения, дыхательные упражнения; ходьба и бег, прыжки на месте, произвольные напряжение и расслабление различных групп мышц. Равномерная нагрузка на антигравитационную позную мускулатуру создавалась при помощи ТНК. В заключительной части тренировки осуществлялись медленная ходьба, упражнения на глубокое дыхание и расслабление. Впоследствии тренировочная программа, разработанная в этом эксперименте с АНОГ, легла в основу профилактики в длительных космических полетах.

Результаты исследований после 30- и 63-суточных космических полетов выявили у космонавтов определенное ухудшение реакции кардиореспираторной системы при тестировании на велоэргометре. Это проявлялось в замедлении процессов вработывания и восстановления, выраженном в ответе сердечно-

сосудистой системы на нагрузку, уменьшении кислородного пульса, возрастании пульсового АД. Отдельные признаки ухудшения реакции кардиореспираторной системы на физическую нагрузку отмечались и ранее после более кратковременных КП и во многом были связаны с явлениями ортостатических нарушений, утомления и нервно-эмоционального напряжения. Следует заметить, что степень изменений реакции кардиореспираторной системы космонавтов на физическую нагрузку после окончания 30- и 63-суточного полетов была примерно одинакова, несмотря на различную длительность пребывания в состоянии невесомости. Причем более быстрое восстановление систем дыхания и кровообращения к предполетному уровню наблюдалось у экипажа второй экспедиции. Следовательно, усовершенствование систем профилактических мероприятий во второй экспедиции способствовало лучшему поддержанию физической работоспособности экипажа (Какурин и др., 1978). Благодаря накопленным на тот момент знаниям о природе нарушений в двигательной системе во время длительного пребывания человека в невесомости, в качестве основного метода профилактики были выбраны локомоторные тренировки. Нарушения, возникающие в двигательной системе в космическом полете, наиболее эффективно купируются естественными локомоциями человека. Пребывание членов экипажей в невесомости до 185 суток стало возможным после полета станции «Салют-6». При выполнении космонавтами разработанной системы бортовых тренировок, возникавшие в организме функциональные изменения не прогрессировали, а после завершения полета достаточно быстро восстанавливались. Это явилось доказательством принципиальной возможности выполнения человеком целенаправленной и продуктивной деятельности в космическом полете (Козловская и др., 2001).

Позднее было показано, что во время быстрого бега ударные воздействия создают моменты сил, схожие с воздействием ускорения в несколько G (De Witt, Ploutz-Snyder, 2014, Фомина, и др., 2018). После цикла проведенных модельных экспериментов и успешных миссий в ДКП было установлено, что именно локомоторная тренировка высокой интенсивности является наиболее

эффективной (Бряннов и др., 1986, Козловская и др., 2008). В 520-суточном изоляционном эксперименте «Марс-500» средства профилактики распределились в следующем порядке по мере убывания эффективности: тренировки на бегущей дорожке в пассивном режиме движения полотна, тренировки на виброплатформе, силовой тренажер MDS, велотренажер, тренировки на бегущей дорожке в активном режиме движения полотна, эспандеры (Фомина, Уськов, 2016).

Поскольку в настоящее время космонавты и астронавты находятся на Международной космической станции в течение 6-12 месяцев, а миссии по исследованию дальнего космоса, согласно современным сценариям, продлятся более года, сохранение здоровья и оптимального уровня функциональных резервов организма является актуальной задачей международного космического сообщества. Физические упражнения являются основным средством, используемым космическими агентствами в целях защиты здоровья человека во время длительного пребывания в космосе. Комплексная программа физических упражнений, реализованная в космосе, была апробирована во время 28–84-дневных миссий «Скайлэб» в 1970-х годах. Используя велоэргометр и различные элементарные тренажеры, члены экипажа «Скайлэб», как правило, сохраняли аэробную работоспособность, однако демонстрировали уменьшение объема *m.gastrocnemius* (по результатам MPT). Последние результаты объясняются снижением экспрессии изоформ тяжелой цепи миозина в мышечных волокнах I типа на 12–17% в *m.gastrocnemius* и *m.soleus* (Rummel et al., 1975). Позднее в условиях МКС удалось провести эксперимент с участием 9 космонавтов и астронавтов в полугодовых миссиях. Члены экипажа тренировались на беговой дорожке, велоэргометре и силовом тренажере. Режим упражнений у членов экипажа варьировался: аэробные упражнения выполнялись примерно 5 часов в неделю с умеренной интенсивностью, а силовые упражнения, включая многочисленные упражнения для мышц голени, выполнялись 3–6 дней в неделю. После полета объем *m.gastrocnemius* уменьшился на $13 \pm 2\%$ при большей атрофии *m.soleus* ($-15 \pm 2\%$). Пиковая мощность *m.gastrocnemius* была снижена на 32% после космического полета. Скоростно-силовые характеристики были

снижены с -20 до -29% по всему спектру скоростей. Эти данные свидетельствуют о снижении массы и работоспособности *m.gastrocnemius* наряду с переходом от медленного типа волокон к быстрым в *m.gastrocnemius* и *m.soleus* (Trappe, et al., 2009). Таким образом, несмотря на соблюдение принципов профилактики негативных влияний невесомости, в полной мере предотвратить потерю мышечной силы не удавалось, и появилась необходимость пересмотреть действующие на МКС рекомендации по физическим тренировкам, чтобы лучше сохранять массу и функции скелетных мышц. Анализ данных локомоторных тренировок и нагрузочных тестов в длительных космических полетах, в который вошли 28 экипажей станции «Мир», показал, что интенсивный интервальный режим физических тренировок обеспечил повышение ортостатической устойчивости сосудистого тонуса после полета (Kozlovskaya, и др., 2015). Показана профилактическая эффективность двух наиболее часто используемых на МКС режимов локомоторных тренировок: интенсивных интервальных тренировок в аэробно-анаэробной зоне мощности (русская модель) и непрерывных тренировок малой интенсивности в аэробной зоне мощности энергообеспечения мышечной деятельности (американская модель). Кроме этого, в новом исследовании было показано сходство изменений в группе астронавтов, выполнявших либо стандартные протоколы бега со средней и низкой интенсивностью и в группе космонавтов, выполнявших протоколы бега с высокой интенсивностью. Изменения прослеживались в отношении вызванных космическим полетом изменений минеральной плотности костей, мышечной массы, мышечной силы и физической работоспособности. Этот факт оказался практически значимым для обеспечения гибкости тренировочного процесса: в то время как некоторым членам экипажа была более приемлема программа бега с более высокой интенсивностью и меньшим объемом (SPRINT), другие предпочитали программу с несколько меньшей интенсивностью и большим объемом (English, et al., 2020). Однако существенной проблемой при оценке эффективности системы профилактики является отсутствие группы космонавтов, которые не выполняли тренировок в полете. На МКС правилами полета

закреплена необходимость выполнения программы системы профилактики, что исключает исследования с контрольной группой «без упражнений». В результате эффективность системы профилактики можно сравнить только с предыдущими миссиями или со временем, предшествовавшим значительным изменениям в техническом обеспечении тренировок (Scott et al., 2019).

Кроме этого, в условиях Земли были проведены эксперименты с 90-суточной АНОГ, где сравнивалась контрольная группа испытуемых (не выполнявших тренировки) с 4 группами испытуемых, которые выполняли тренировки различной направленности (аэробные, силовые, одновременные аэробные и силовые тренировки с низкой нагрузкой и одновременные аэробные и силовые тренировки с высокой нагрузкой). Необходимо подчеркнуть, что под аэробными тренировками в англоязычной литературе подразумеваются циклические тренировки в умеренной зоне мощности согласно классификации Фарфеля, принятой в России. Во всех 4 группах было показано улучшение физической работоспособности по сравнению с контрольной группой, наиболее значимые показатели были достигнуты при одновременном использовании аэробных и силовых тренировок высокой интенсивности. Аэробные тренировки выполнялись на вертикальной беговой дорожке с величиной осевой нагрузки около 80 %. Три раза в неделю в течение 30 минут выполнялся непрерывный бег с 80% от МПК и один раз в неделю — 4 интервала бега по 4 минуты с 90% от МПК (Hedge et al., 2022, Wang et al., 2023). Таким образом, показана эффективность применения высокоинтенсивных локомоторных и силовых тренировок для предотвращения потери мышечной силы и снижения физической работоспособности в целом.

Во время длительного космического полета существует риск возникновения ситуации недоступности используемых тренажеров и средств профилактики вследствие технических или медицинских ограничений. В таком случае необходимо обоснованное изменение привычной схемы микроцикла тренировок, в котором либо сокращается общее время тренировок, либо производится

вынужденная замена средств на дополнительные. Кроме этого, следует определить, на каком из этапов полета эта замена будет безопасна для здоровья и работоспособности, а также установить оптимальную длительность периода изменения тренировок. Последствия изменений в тренировочном микроцикле, возможно, повлекут за собой значимое снижение физической работоспособности. Также есть наблюдения, указывающие на то, что эти изменения будут индивидуальными и разнонаправленными.

1.3 Методы оценки изменений энергообеспечения мышечной деятельности в условиях невесомости как способ оценки величины функциональных резервов

1.3.1 Выбор протокола нагрузочного тестирования на бегущей дорожке

На сегодняшний день не существует единого стандартного теста для определения физической работоспособности (Сонькин, 2010). Многообразие протоколов нагрузки, а также вариативность интерпретации результатов нагрузочного тестирования являются препятствием для сопоставления результатов оценки уровня физической работоспособности. Одним из важных факторов, свидетельствующих об информативности избранного теста на физическую работоспособность, является вид эргометра, на котором выполняется данный тест. Показано, что реакции вегетативных систем, прежде всего сердечно-сосудистой и дыхательной, на выполнение тестирования на беговой дорожке и на велоэргометре различаются из-за разницы в задействовании активных групп мышц и их массы (Carter et al., 2000, Muscat et al., 2015, Koschate et al., 2016). Ходьба и бег являются основными способами передвижения человека, поэтому очевидно, что наиболее важно оценивать уровень работоспособности для прогнозирования успешности работ во время внекорабельной деятельности на поверхности другого небесного тела нужно именно с использованием беговой дорожки, а не велоэргометра. Показано, что более выраженная реакция сердечно-сосудистой системы на физическую нагрузку, выполняемую на беговой дорожке

по сравнению с велоэргометром, определяется вовлечением большего числа групп мышц (Carter, et al., 2000, Koschate, et al., 2016, Fomina, и др., 2016).

Для оценки уровня физической работоспособности до, во время и после космического полета космонавты выполняют нагрузочные тестирования на тредмиле и велоэргометре. И если в земных условиях сбор информации и организация тестирований и тренировок на бегущей дорожке не имеет препятствий, то в условиях космического полета ранее для их осуществления существовали технические проблемы, которые были решены благодаря развитию инженерно-конструкторской и медико-биологической отрасли. Сбор информации о тестировании и тренировках в условиях космического полета в настоящее время стал более совершенным (Ярманова, 2021).

Большинство тестов с физической нагрузкой у партнеров по МКС выполняется на велоэргометре (Moore Jr et al., 2014, Moore et al., 2015, Hoffmann et al., 2016, Scott et al., 2019, Sutterfield et al., 2019). Несмотря на то, что результаты этих исследований дают важную и достоверную информацию о физиологических процессах в ответ на физическую нагрузку, специфичность типичных для человека локомоций — ходьбы и бега — требуют, по нашему мнению, выполнение тестов на бегущей дорожке, в том числе для прогнозирования успешности работ во время внекорабельной деятельности на Луне или Марсе.

Важными аспектами при составлении нагрузочного протокола также являются цель, информативность, продолжительность нагрузочного теста. Основной целью нагрузочного тестирования в космической медицине является, в первую очередь, определение физической работоспособности, и, соответственно, оценка уровня функциональных резервов организма. На основании заключения по результатам тестирования у врача экипажа и специалистов по профилактике гипогравитационных нарушений и послеполетной реабилитации формируется представление об индивидуальной динамике уровня функциональных резервов организма на всех этапах космического полета. При необходимости выдаются

рекомендации по корректировке тренировочного процесса во время полета. В связи с этим тест должен обладать высокой информативностью и универсальностью для лиц с разным уровнем функциональных резервов. Как известно, измерение максимального потребления кислорода считается «золотым стандартом» измерения интегрированной кардиореспираторной функции и физической работоспособности человека (Lee, Zhang, 2021). Однако проведение такого теста невозможно без присутствия медицинского персонала, поэтому методом выбора считается тест, где будет производиться регистрация субмаксимальной ЧСС и пикового значения потребления кислорода ($\text{VO}_2\text{пик}$), которые более удобны по продолжительности и имеют меньшее количество медицинских и технических ограничений при его применении.

Результаты многочисленных исследований подтверждают, что разнообразие вариантов продолжительности нагрузочного тестирования и типа эргометра влияют на показатель потребления кислорода. Этот факт подтверждён в работах как на тренированных испытуемых и спортсменах, так и у физически неактивного контингента (Buttar et al., 2019). Выполнение широко распространённого в функциональной диагностике протокола Bruce на определение МПК осуществляется за счет крутого уклона беговой дорожки (начиная с 10%) и более медленных скоростей локомоций. Даже при значительном наклоне скорость бега трусцой достигается только на третьей ступени теста, через шесть минут после начала тестирования. Было высказано предположение, что выраженные наклоны, используемые во время протокола Bruce, вызывают мышечную усталость в нижних конечностях до начала достижения максимального потребления кислорода (Nordrehaug et al., 1991). Кроме этого, использование наклона полотна бегущей дорожки невозможно при тестировании работоспособности космонавтов по техническим причинам. Для сокращения времени теста могут быть реализованы две стратегии: использование более высоких приращений скорости для каждого этапа и уменьшение продолжительности ступени. Имеются данные, которые указывают на незначительные различия МПК в тестах с продолжительными ступенями (2–3 минуты) и короткими ступенями (30 сек)

(Sperlich et al., 2015). Однако составление протокола теста для космонавтов должно быть не только оптимальным по общему времени тестирования, но и обеспечивать субмаксимальный, а не максимальный уровень нагрузки. При подготовке к межпланетным полетам необходимо разработать протокол, который будет выполняться как в полете, так и после полета для использования его в прогнозировании уровня работоспособности.

В составлении нагрузочного протокола также необходимо решение еще одной довольно сложной и важной задачи. В условиях земной гравитации локомоторная нагрузка проводится с 100% весом тела испытуемого. В условиях невесомости организация локомоторных тренировок и тестирований предусматривает «притяг» испытуемого к полотну бегущей дорожки, составляющий лишь 70–80% от веса тела на Земле. Таким образом, в ходе полета наблюдается снижение вертикальной осевой нагрузки и выраженности физиологического ответа на нагрузочное тестирование. В итоге создаются трудности при сопоставлении фоновых и полетных параметров тестирования. Часто при оценке физической работоспособности в ходе космического полета используется ЧСС как наиболее доступный параметр. И если учесть, что в тесте с нагрузкой в условиях Земли будет достигнута субмаксимальная ЧСС, то во время космического полета этого может не произойти. Поэтому при составлении протокола тестирования необходимо учесть исходную физическую работоспособность, возраст космонавтов, длительность теста, количество и длительность ступеней. При анализе данных, полученных в полете, кроме прочего, необходимо учитывать уровень вертикальной осевой нагрузки.

Изучение аэробных возможностей в условиях космического полета в российской системе проводится несколько раз за полет с помощью высокоинтенсивных тестов. В настоящее время в российской системе профилактики штатным тестом для оценки физической работоспособности является тест «МО-3», который имеет ряд недостатков. Во-первых, к недостаткам следует отнести нестандартность нагрузки, космонавт сам выбирает скорость локомоций на каждой ступени нагрузки (тест выполняется в пассивном режиме

движения полотна бегущей дорожки, т. е. передвижение полотна дорожки осуществляется усилием ног). При выполнении бега в пассивном режиме сложно поддерживать одинаковую скорость локомоций на ступени, предписанную протоколом. Во-вторых, дистанция в тесте также не является стандартной даже у одного и того же космонавта в разных тестах, это обусловлено не только изменениями физической работоспособности, но и морально-волевыми качествами обследуемого. В-третьих, тест МО-3 в пассивном режиме движения полотна дорожки затруднительно выполнять после полета. Опыт использования теста МО-3 в космическом полете показал, что реакция ЧСС на ступенчато-возрастающую физическую нагрузку была более ярко выражена в течение первых 45 дней полета, что характеризует протекание адаптивных перестроек физиологических систем к условиям невесомости. В ходе длительного космического полета в группе космонавтов не наблюдалось отчетливых изменений физической работоспособности по результатам теста МО-3. В периоде реадаптации после полета также зарегистрировано повышение физиологической стоимости нагрузки (Popov et al., 2004, Kozlovskaya et al., 2015).

1.3.2 Пульсовые методы определения работоспособности и риск сердечно-сосудистой патологии в космическом полете

На протяжении многих лет происходит непрерывный анализ записей ежедневных тренировочных нагрузок, осуществляемых космонавтами в длительных космических полетах. На основе этих данных производится оценка физической работоспособности космонавтов и коррекция тренировочного стимула. В связи с тем, что в запись тренировки входит лишь один физиологический показатель (частота сердечных сокращений), специалистам на основе этого показателя необходимо обосновывать определенный тренировочный процесс и подход к использованию средств профилактики гипогравитационных нарушений. Однако физическая работоспособность — интегральное понятие, отражающее психофизическую характеристику организма, в том числе свойства скелетной мускулатуры, вегетативное и энергетическое обеспечение, нервную и

гуморальную регуляции, а также мотивацию индивида, выражающиеся в величине объема и интенсивности произведенной механической работы. Кривые абсолютных значений ЧСС могут быть информативными только в узком диапазоне аэробных нагрузок.

Для оценки степени проявления аэробных и анаэробных возможностей в конкретных условиях теста на физическую работоспособность и уровень функциональных резервов, либо для оценки тренировочного эффекта используются пульсовые показатели. Например, в спортивной физиологии используются методы, определяющие физическую работоспособность на основании однократного измерения МПК с использованием эргоспирометрии в фоновом периоде. Для определения эффективности тренировок на основании кривых ЧСС можно определить порог анаэробного обмена (ПАНО) или МПК (Eremeev et al., 2020, Kozlov et al., 2022), что является перспективным для длительных космических и предстоящих автономных полетов (Козловская и др., 2010).

Пульсовая стоимость работы определяется в спортивной физиологии как разность общего числа сердечных сокращений за время упражнения и их количества за соответствующий период в покое (Brodan, 1967, Engelen et al., 1996, Kozlov et al., 2022, Волков и др., 2003).

Пульсовая стоимость восстановления — излишек пульсовых ударов в восстановительный период сверх уровня, соответствующего ЧСС в состоянии относительного покоя. Пульсовая стоимость восстановления (или пульсовой долг) является отражением так называемого «долга по крови», т. е. характеризует отставленную по времени стимуляцию деятельности сердечно-сосудистой системы, осуществляющуюся за счет накопившихся во время работы продуктов метаболизма.

Некоторые из этих показателей использовались для изучения работоспособности испытуемых, у которых после воздействия 21-суточной сухой иммерсии было зарегистрировано увеличение пульсовой стоимости работы и пульсовой суммы восстановления при выполнении теста со ступенчато-

возрастающей нагрузкой (Лысова и др., 2020, см. главу Методы исследования, протокол ТИС).

В тестах с субмаксимальной нагрузкой наиболее информативным является определение анаэробного порога (ПАНО), который определяет период перехода энергетического метаболизма в мышечной ткани на анаэробно-гликолитический путь ресинтеза АТФ, обладающий большей скоростью, чем скорость митохондриального окисления пирувата. Информация об уровне нагрузки (скорость в км/ч или Вт) и уровень ЧСС в момент анаэробного порога позволяет оценить уровень физической работоспособности, не прибегая к выполнению максимального теста. Кроме этого, определение ПАНО позволяет составить тренировочную программу с направленностью на увеличение аэробных возможностей в зоне относительной большой мощности циклических упражнений, а также оценить эффективность этих тренировок (Kozlov et al., 2019, Sales et al., 2019, Poole et al., 2021, Козлов et al., 2023).

В отличие от локомоторной нагрузки в земных условиях, где уровень осевой нагрузки равен 100%, в условиях невесомости важно учитывать уровень осевой нагрузки, создаваемый посредством тренировочно-нагрузочного костюма (ТНК). Как правило, на начальном периоде специалисты рекомендуют устанавливать уровень 50–60% от веса тела, а далее величина осевой нагрузки достигает около 70%. Это является дополнительным фактором, который учитывается при оценке физической работоспособности космонавтов в тесте МО-3. С целью учета факторов, влияющих на мощность выполняемой работы в тесте МО-3 в условиях невесомости, был предложен термин «физиологическая стоимость нагрузки» (Kozlovskaya, Grigoriev, 2004) в виде формулы:

$$\bullet \quad \Phi C = \Delta ЧСС / (V * L),$$

где:

ΦC — физиологическая стоимость нагрузки,

V — скорость локомоций (км/ч),

L — величина осевой нагрузки (в % от веса тела).

Достоверное увеличение экономичности работы сердца и снижение прироста ЧСС в ответ на физическую нагрузку при нагрузочной пробе свидетельствует об уровне функциональных резервов. Гораздо большее диагностическое значение имеет неадекватно малый прирост ЧСС при физической нагрузке, который получил название хронотропной недостаточности. Разность между максимально достигнутой и исходной ЧСС (т. н. хронотропный резерв сердца) у условно здоровых лиц в среднем составляет 85–90 уд/минуту (Гаджиева и др., 2015). Хронотропная недостаточность — это неспособность сердца увеличивать частоту ритма в ответ на физическую и эмоциональную нагрузку. Появление признаков хронотропной недостаточности часто свидетельствует о состоянии «перетренированности», которое сопровождается нарушением функции левого желудочка. Однако установлено, что хронотропная функция также снижается и у спортсменов за счет повышения инотропного резерва. Этот процесс происходит в результате активации симпатического отдела вегетативной нервной системы и увеличения сократительной функции миокарда. Очевидно, что более выгодно достичь нужного минутного объема при низкой частоте сердечных сокращений и большом ударном объеме, чем при высокой частоте сердечных сокращений и небольшом ударном объеме. Так как относительно большое количество энергии затрачивается в фазу систолы сердечного цикла, то, чем реже это происходит, тем это более энергетически выгодно (Баранова, Капилевич, 2014). Понятие хронотропной недостаточности, однако, ранее не использовалось при интерпретации результатов нагрузочного тестирования у космонавтов. Это, в первую очередь, связано с тем, что референтные значения нормы для показателей ответа сердечно-сосудистой и дыхательных систем в группе космонавтов не существуют, а соотношение с клиническими значениями, которые получены на нетренированном контингенте либо на спортсменах, также может быть некорректным. Однако ранее было

установлено, что во время длительных КП у космонавтов наиболее часто наблюдаются усиление хронотропной функции сердца, увеличение минутного объема крови, повышение систолического артериального давления и систолического давления в легочной артерии, однако все эти показатели не выходят за пределы физиологической или возрастной нормы (Алферова, и др., 2002). В нагрузочных пробах отмечаются проявления снижения реактивности сердечно-сосудистой системы на нагрузку с увеличением возраста (Турчанинова, и др., 2010).

Таким образом, нагрузочное ЭКГ-тестирование с эргоспирометрией у космонавтов может быть полезным не только для оценки уровня физической работоспособности, но и для оценки риска развития патологии кардиореспираторной системы, которая, как известно, в процессе полета может претерпевать морфологические и функциональные изменения.

1.3.3 Метод интерференционной поверхностной электромиографии

Уже известно, что скелетная мускулатура изменяется под воздействием условий невесомости. При этом используется «золотой» стандарт диагностики нарушений в мышечной ткани — биопсия, являющаяся инвазивной медицинской процедурой. В связи с ограничениями применения метода биопсии имеется необходимость совершенствования методов диагностики мышечных потерь во время космических полетов, который будет наиболее информативным. Поверхностная электромиография (пЭМГ), записанная во время сокращения мышц, представляет собой сигнал, характеризующий нервный импульс от центральной нервной системы (ЦНС) к скелетным мышцам (Епока, 2019, Farina, Епока, 2023). Поверхностная электромиограмма включает сумму электрических импульсов, осуществляемых активными двигательными единицами (ДЕ). Считается, что пЭМГ раскрывает некоторые особенности самой скелетной мышцы, к примеру соотношение медленных и быстрых типов мышечных волокон (Casabona et al., 2021). Нелинейные параметры характеризуют состояние системы

в целом, независимо от ее отдельных единиц (молекул, атомов и т. д.). При этом линейные параметры отражают активность отдельных мышц или мышечных волокон, а нелинейные параметры сигнала пЭМГ характеризуют состояние всей системы — генератора ЦНС или мотонейронного пула.

Среди множества возможностей практического применения поверхностной ЭМГ при изучении нейронного контроля движения основное внимание уделяется взаимосвязи между особенностями параметров поверхностной ЭМГ и лежащими в ее основе физиологическими процессами (Farina et al., 2004, Çalışkan, Bilgin, 2022). Часто сигнал пЭМГ считается полученным от одной мышцы, однако технически при традиционной конфигурации записи с двумя электродами обнаружить активность на уровне одной двигательной единицы не представляется возможным. Амплитуда и спектр частот поверхностной ЭМГ, являющиеся основными линейными характеристиками сигнала пЭМГ, зависят от мембранных свойств мышечных волокон, а также от времени потенциалов действия двигательных единиц. Таким образом, можно утверждать, что поверхностная ЭМГ отражает как периферические, так и центральные свойства нервно-мышечной системы. Считается довольно эффективным применение математических моделей для характеристики чувствительности пЭМГ к параметрам систем, участвующих в генерации и обнаружении сигнала (Wu et al., 2019). Благодаря этим методикам и математическим структурным моделям теперь имеется возможность для описания генерации поверхностной ЭМГ в проводниках сложного объема как следствия различных стратегий управления движениями (Merletti, Muceli, 2019).

Для изучения взаимосвязи между свойствами поверхностной ЭМГ и нервно-мышечной системы используются прямой и обратный подходы. Перспективный прямой подход, реализованный с помощью математического моделирования, позволяет прогнозировать влияние различных физиологических процессов на характеристики поверхностной ЭМГ. Обратный подход использует свойства сигнала пЭМГ для определения изменений физиологических процессов

в нервно-мышечной системе. Однако обратный подход требует упрощений для уменьшения числа параметров и множества решений, влияющих на их взаимосвязь. Соотношение между средней скоростью проводимости мышечных волокон и спектральными частотами поверхностной ЭМГ во время, к примеру, изометрических сокращений, выдерживаемых с постоянной силой (Ranaldi et al., 2022), является свидетельством в пользу того факта, что физиологические связи между нервной и мышечной тканями определяют характеристики ЭМГ. Обратная задача включает оценку изменений средней скорости проводимости по характеристическим спектральным частотам и может быть решена путем аппроксимации этого соотношения линейным уравнением.

1.3.3.1 Амплитуда поверхностной электромиограммы

Амплитуда поверхностной ЭМГ может быть оценена с помощью схемы детектирования, сглаживания и повторной аппроксимации сигнала. В этом процессе детектирование выпрямляет сигнал ЭМГ, сглаживание фильтрует сигнал, а повторная аппроксимация инвертирует степенной закон, применяемый на этапе детектирования, и возвращает сигнал в единицы амплитуды ЭМГ (Clancy et al., 2023).

Амплитуда поверхностной ЭМГ связана с описанием прямой активности двигательных единиц, то есть со скоростью рекрутирования и количеством активных двигательных единиц. Вследствие этой связи некоторые исследователи используют амплитуду ЭМГ в качестве показателя уровня активации, обеспечиваемой спинным мозгом. Однако на амплитуду ЭМГ влияют такие факторы, как расположение электродов, толщина подкожных тканей, распределение скоростей проводимости двигательных единиц и система регистрации сигнала, используемая для получения записи (Farina, Enoka, 2023). Поэтому при интерпретации сигнала ЭМГ важно использовать совокупность дополнительных параметров, которые позволяют раскрыть истинные процессы, происходящие в нервно-мышечной системе.

Процесс подавления амплитуды пЭМГ не учитывает сигнала активации, посылаемого от мотонейронов к мышечной ткани в результате отмены положительных и отрицательных фаз потенциалов действия ДЕ (Day, Hulliger, 2001). Степень подавления сигнала может быть определена количественно путем сравнения амплитуды сигнала, полученной путем суммирования потенциалов действия ДЕ до и после каждого потенциала (Day, Hulliger, 2001, Keenan et al., 2003). Подавление присутствует только в случае, когда суммируются неисправленные потенциалы действия. Этот факт подчеркивает важность интерпретации результатов обработки амплитуды ЭМГ.

1.3.3.2 Спектральный анализ поверхностной электромиограммы

Спектральный анализ сигналов поверхностной ЭМГ используется для изучения мышечного утомления (Merletti et al., 1990, Semmler, Nordstrom, 1998, Fattorini et al., 2005) и для определения изменений в рекрутировании ДЕ (Solomonow et al., 1990, Bernardi et al., 1996, Bernardi et al., 1999). Характерные спектральные частоты могут быть вычислены с помощью классической периодограммы, или преобразованием Фурье (Merletti, Conte, 1997) и подходов, основанных на авторегрессионном моделировании (Paiss, Inbar, 1987), или с помощью передовых методов, таких как частотно-временные распределения класса Коэна (Bonato et al., 2001) и вейвлет-анализ (Karlsson et al., 2000). Последние методы использовались при выполнении динамических задач (Balestra et al., 2001, Bonato et al., 2001) и могут быть более подходящими, чем классические подходы, когда сигналы не являются нестационарными.

Спектральный анализ поверхностной ЭМГ также использовался для оценки активации мышечных волокон I и II типов и определения типа двигательных единиц во время сокращения (Bilodeau et al., 2003). Обоснование применения этого метода заключается в том, что диаметр мышечных волокон и, следовательно, частота импульсации ДЕ систематически варьируются в зависимости от типа и скорости включения ДЕ и оказывает лишь незначительное влияние на спектр мощности пЭМГ (Lago, Jones, 1977).

В эксперименте с изоляцией в гермообъекте «Марс-500» у 6 испытуемых изучались линейные параметры пЭМГ— средняя частота и амплитуда сокращений в локомоторном тесте на пассивной бегущей дорожке «МО-3». Основной целью исследования являлось сравнение эффективности выполнения тренировок на шести средствах профилактики атрофии мышц. В результате в *m.soleus* средняя частота пЭМГ оказалась снижена после 70 дней тренировок на пассивной беговой дорожке и через 35 дней — на вибрационной платформе. Это может быть вызвано более ранним рекрутированием двигательных единиц *m.soleus* по сравнению с *m.gastrocnemius* во время локомоций на пассивной беговой дорожке, в то время как на активной беговой дорожке синергисты активируются синхронно. В других мышцах голени после 70 дней силовых упражнений средняя частота пЭМГ уменьшилась. Что касается результатов обработки амплитуды пЭМГ, то существенной разницы между воздействием различных средств профилактики обнаружено не было. Только после тренировок в активном режиме работы бегущей дорожки амплитуда пЭМГ в *m.gastrocnemius* незначительно увеличилась на всех скоростях локомоций (Meigal, Fomina, 2016).

1.3.3.4 Нелинейный метод анализа поверхностной электромиограммы

Было предложено исследовать центральные стратегии нервно-мышечной системы с помощью переменных, извлеченных из поверхностной ЭМГ с помощью обратных нелинейных методов (Webber Jr et al., 1995, Nieminen, Takala, 1996). Уэббер и соавт. (Webber Jr et al., 1995) сообщили, что незначительные изменения поверхностной ЭМГ из-за силовой модуляции могут оказывать большее влияние на процент детерминизма в сигнале по сравнению с влиянием на спектральные частоты. Также было высказано предположение (Filligoi, Felici, 1999, Felici et al., 2001), что процент детерминизма во время сокращений способен обнаруживать синхронизацию ДЕ в мышцах, поскольку измерение выявляет определенные программы стохастического сигнала. Вопреки этим ожиданиям, процент детерминизма сильно коррелирует с характерными спектральными частотами и не предоставляет дополнительной информации, когда синхронизация

ограничена значениями, наблюдаемыми в мышцах здоровых испытуемых (например, в фоновых измерениях) (Farina et al., 2002). Однако при наличии высоких уровней синхронизации ДЕ анализ повторных измерений может предоставить больше информации о степени синхронизации, чем спектральный анализ (Farina et al., 2002).

Анализ пЭМГ широко используется для характеристики электрической активности мышечных волокон во время сокращения, как в изометрических, так и в изотонических условиях. Независимо от типа сокращения, увеличение продолжительности мышечных сокращений с течением времени неизменно вызывает начало мышечного утомления, определяемого как неспособность поддерживать генерацию силы с течением времени. На сегодняшний день результаты анализа пЭМГ показали, что признаки мышечного утомления могут проявляться до его начала, предполагая, что восприимчивость мышц к утомлению может быть оценена неинвазивно с кожи. Эти ранние признаки электромиографических изменений мышечного утомления представляют наибольший интерес в физиологии, патофизиологии, тренировочном процессе и реабилитационных исследованиях. Однако из первых исследований по анализу пЭМГ во время динамических сокращений стало очевидно, что сигнал пЭМГ демонстрирует сложность, обусловленную многими сопутствующими факторами. Поэтому в последние годы различные методы анализа, основанные на сложности, ранее применявшиеся к физическим и другим биологическим временным рядам, были применены к анализу пЭМГ в поисках новых методов для индивидуализации раннего и эффективного начала электромиографического мышечного утомления во время устойчивого изотонического и изометрического сокращения мышц (Vossia et al., 2015).

Ранее были разработаны переменные линейной и нелинейной пЭМГ, выявляющие различные компоненты мышечного утомления. В частности, производилась проверка скорости изменений фрактальной размерности и частоты импульсации в качестве описания синхронизации двигательных единиц и периферических проявлений мышечного утомления соответственно. Было

обнаружено, что скорость изменения фрактальной размерности у пожилых людей выше, чем у молодых, что свидетельствует об увеличении синхронизации ДЕ в процессе старения. Эти результаты свидетельствуют о том, что анализ фрактальной размерности может быть использован в качестве дополнительной переменной, предоставляющей информацию о центральных механизмах в отношении скорости проводимости при усиленной мышечной работе.

Изучение нелинейных параметров пЭМГ как методики диагностики нервно-мышечных патологий проводится довольно давно. В частности, имеются данные о применении этой методики у пациентов с болезнью Паркинсона. Результаты показали, что значения таких нелинейных параметров пЭМГ, как рекуррентность, детерминизм, эксцесс, корреляционная размерность и энтропия значительно отличались между пациентами с болезнью Паркинсона и здоровыми контрольными группами. Нелинейные параметры, в отличие от традиционных спектральных или амплитудных параметров, коррелируют с Единой шкалой оценки болезни Паркинсона. Наиболее значимые различия между группами были обнаружены в условиях нагрузки, где не применялось дополнительного веса при изометрическом сгибании в локтевом суставе. Не было обнаружено существенных различий в характеристиках пЭМГ между контрольными группами пожилого и молодого контингента (Meigal et al., 2009).

Высокая степень синхронизации двигательных единиц, как известно, оказывает значительное влияние на поверхностные переменные ЭМГ, извлеченные методами линейного и нелинейного анализа. Для определения величины этих влияний применялся спектральный и рекуррентный количественный анализ как к моделируемым, так и к экспериментальным сигналам ЭМГ (у больных паркинсонизмом). Экспериментальные результаты показали, что процент детерминизма был значительно выше в состоянии покоя (с наличием тремора), чем во время произвольного сокращения (которое частично подавляло тремор). Напротив, средняя частота не зависела от состояния тремора, подтверждая результаты моделирования. В целом эти результаты показали, что линейный и нелинейный анализ поверхностной ЭМГ может иметь различную

чувствительность к основным физиологическим механизмам в конкретных условиях, поэтому их совместное использование обеспечивает более полное представление о состоянии мышц, чем проведение только спектрального анализа (Fattorini et al., 2005).

Другими словами, записи ЭМГ следует исследовать не только линейными, но и нелинейными методами, чтобы определить условия, приводящие к внутренним изменениям или утомлению в мышце (Vromans, Faghri, 2017). Хаос наблюдается во многих нелинейных динамических системах. Моделирование процесса хаоса в сигнале ЭМГ проводилось на основе некоторых нелинейных признаков, таких как показатель Ляпунова (Wolf et al., 1985), энтропия и фрактальная размерность (Singh et al., 2019, Beretta-Piccoli et al., 2023, Khodadadi et al., 2023).

1.3.3.5 Поверхностная электромиография в условиях невесомости

В экспериментах, выполненных по программе биоспутников «Бион» на обезьянах, были получены уникальные данные о различиях в реакции быстрых и медленных двигательных единиц на устранение опоры. Обезьяны в полете выполняли задачу удержания нагруженного рычага с усилием до 20% от максимального значения, при этом регистрировалась ЭМГ *m.tibialis anterior*, *m.gastrocnemius*, *m.soleus*. Установлено, что до и во время космического полета это движение выполняется в основном *m.soleus*, но позже выявилась сначала тенденция к росту активности в сторону *m.gastrocnemius*, а к самому концу полета заданное движение выполнялось почти исключительно *m.gastrocnemius*. Наблюдалось постепенное изменение стратегии моторного контроля в условиях невесомости: смещение активности медленных мышечных волокон в сторону быстрых. Возможно, это было связано с тем, что управление быстрыми мышечными волокнами становится более эффективным. Было выдвинуто предположение, что нервная система претерпевает реорганизацию паттернов, направленную на усиление рекрутирования быстрых двигательных единиц по

сравнению с медленными, а также мышц-сгибателей по сравнению с мышцами-разгибателями. Эти данные указывают на то, что некоторые изменения моторного контроля во время локомоций зависят от постоянства гравитационной среды Земли (Recktenwald et al., 1999, Canu et al., 2003). Позднее ученые оценивали влияние условий невесомости на осуществление произвольных движений верхних конечностей и четвероногую локомоцию приматов. До, во время и после 14-дневного космического полета и моделирования полета при нормальной гравитации изучалась активность ЭМГ мышц *m. biceps brachii* и *m. triceps brachii* при произвольных движениях верхних конечностей макак-резусов. При выполнении этих движений средняя амплитуда ЭМГ значительно снизилась во время полета по сравнению с пред- и послеполетными значениями. По сравнению с обезьянами, находящимися в условиях невесомости, обезьяны из контрольной группы на Земле не показали изменений в продолжительности активности и средней амплитуды сигнала ЭМГ. После космического полета произошли изменения четвероногой локомоции. Животные испытывали некоторые трудности с передвижением, количество аномальных шагов было увеличено. Интегрированная площадь активности *m.triceps brachii* была увеличена во время локомоции. Взятые вместе, эти данные показали, что космический полет вызывает двойной адаптационный процесс: сначала двигательный пул мускулатуры верхней конечности модифицировался во время воздействия условий невесомости, а затем, по возвращении на Землю, обезьяны изменили свою новую двигательную стратегию и заново приспособились к нормальной гравитации (Canu et al., 2003).

Ранее была проведена работа с использованием поверхностной электромиографии (пЭМГ) в коротком полете (17 суток) у 4 астронавтов, проанализирована ЭМГ-активность *m. soleus*, *m.tibialis anterior* и *m.gastrocnemius*. В ходе анализа было установлено, что средняя амплитуда пЭМГ *m.soleus* во время подошвенного сгибания на 10 и 50 % от максимальной произвольной силы (МПС) была выше в полете, чем в условиях Земли. При этом в *m.gastrocnemius* никаких изменений не было найдено. Амплитуды ЭМГ *m.tibialis anterior* были значительно

выше, чем перед полетом, как при сокращениях 10 %, так и 50 % от МПС, и оставались повышенными после полета при 50 % от МПС. Амплитуды ЭМГ *m.soleus* и *m.gastrocnemius* были значительно выше в полете, чем до или после полета в тестах при 10 % и 50 % от МПС. Эти данные свидетельствуют о том, что наиболее последовательной реакцией на условия космического полета было повышение уровня сокращений мышц агонистов и антагонистов при попытке поддерживать постоянные крутящие моменты на заданном уровне максимальной произвольной силы. Также в этом исследовании производилась запись суммарной ЭМГ-активности *m.soleus* и *m.tibialis anterior* в течение суток: наблюдалось значительное увеличение амплитуд по сравнению с записями до полета. Эти данные указывают на то, что космический полет представляет собой модель повышенной активации как сгибателей, так и разгибателей мышц. Авторы отмечают, что этот факт, вероятно, отражает влияние запрограммированного графика работы в полете, а не прямого влияния отсутствия гравитации (Edgerton et al., 2001). У тех же astronauts производился забор биопсии *m.soleus* до и после полета. Несмотря на высокую активность ЭМГ, после полета поперечное сечение медленных волокон I типа и быстрых волокон IIa типа снизилось в среднем на 15 и 26%. У всех astronauts в послеполетных образцах мышечных волокон I типа, экспрессирующих тяжелую цепь миозина, развивалась меньшая средняя пиковая сила активации Ca^{+2} во время сокращений с фиксированным концом мышечного волокна. Вызванное условиями невесомости снижение абсолютной пиковой силы активации Ca^{+2} было связано с уменьшением диаметра волокна и/или абсолютной пиковой силы активации Ca^{+2} на площадь поперечного сечения волокна. В образцах мышечных волокон astronauta, у которого наблюдалась наибольшая относительная потеря пиковой силы, также выявлено снижение чувствительности к Ca^{+2} .

Повышенная скорость сокращения медленных волокон *m.soleus* I типа в образцах, полученных после полета, не может быть объяснена только изменениями в составе тяжелой или легкой цепи миозина. Одним из альтернативных объяснений является то, что повышенная скорость сокращения

волокна является результатом увеличенного расстояния между миофиламентами. Эта гипотеза была подтверждена после анализа результатов электронной микроскопии, продемонстрировавшей снижение плотности тонких нитей миофиламентов после космического полета (Edgerton et al., 2001).

Результаты этого исследования показывают, что клеточные процессы сокращения скелетных мышц изменяются во время 17-суточного космического полета. Эксперименты с выполнением изотонических сокращений выявили изменения в производстве силы, скорости и мощности сокращения мышечных волокон I типа *m.soleus* после полета. Предположительно, эти изменения являются результатом отсутствия нормальной активности постуральных мышц нижних конечностей в условиях пониженной гравитации (Widrick et al., 1999). Результаты этих экспериментов также были сопоставлены с результатами АНОГ, где оценивался размер мышечного волокна, состав и сократительные характеристики *m.gastrocnemius* четырех членов экипажа во время 17-дневного космического полета и восьми человек во время 17-дневного АНОГ. Протоколы тренировок и сроки этих двух исследований были идентичны, что позволило проводить прямые сравнения между группой в космическом полете и группой с воздействием АНОГ. Биопсию *m. gastrocnemius* и *m.soleus* проводили до космического полета и в течение 3 часов после полета, а также до и после АНОГ. Максимальная изометрическая сила *m. gastrocnemius* и характеристики параметров силы и скорости не изменились ни после полета, ни после АНОГ. Кроме того, ни условия невесомости, ни АНОГ не оказали влияния на состав волокон или размер волокон *m. gastrocnemius*. Поскольку мышечная сила не снижалась как во время гипокинезии, так и во время космического полета, эти данные свидетельствуют о том, что, возможно, силовые тренировки являлись эффективной профилактической мерой (Trappe et al., 2001).

Таким образом, исследование изменений в ходе длительного космического полета нелинейных параметров пЭМГ во время локомоторных тестов ранее не проводилось. Учитывая сложность и недоступность биопсии мышц во время и после космического полета для определения успешности профилактических мер

или оценке изменений в мышечных волокнах, перспективным методом для решения этих задач является поверхностная ЭМГ и использование новых методов интерпретации ее записей.

ГЛАВА 2

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено на основе анализа данных, полученных в ходе реализации космического эксперимента «Профилактика-2», целью которого являлось раскрытие механизмов действия и эффективности различных методов профилактики нарушений в деятельности двигательной системы космонавта в длительных космических полетах. В эксперименте приняли участие 12 российских членов экипажей, при этом 2 космонавта из 12 участвовали в эксперименте дважды, таким образом, в результатах обсуждается 14 случаев. Один из космонавтов выполнил годовой полет (355 суток), остальные участвовали в полугодовых миссиях (184 ± 33 суток). Средний возраст космонавтов составлял 44 ± 7 года. Индекс массы тела в исследуемой группе космонавтов составил в среднем $27,4 \pm 4,1$ кг/м².

Профилактические мероприятия на борту МКС

Физические тренировки для участников эксперимента планировались в соответствии с российской программой 2 раза в день, общей продолжительностью 150 мин в сутки, включая гигиенические процедуры. Ежедневно планировались тренировки на бегущей дорожке «БД-2» (ИМБП, Россия) с чередованием через день второй тренировки на велотренажере «ВБ-3М» (ИМБП, Россия) и силовом тренажере ARED (Advanced Resistive Exercise Device, США). Тренировочный микроцикл российской системы профилактики представлен в таблице 1.

Таблица 1 — Длительность тренировок в соответствии с бортовой документацией российского сегмента МКС

Средство профилактики	День микроцикла и длительность тренировки, мин			
	1-й	2-й	3-й	4-й
БД-2	33	39	42	0-33
ARED		60		60
ВБ-3М	25	26	30	

В десяти случаях космонавты выполняли профилактические мероприятия строго в соответствии с бортовой документацией, в остальных четырех случаях по медицинским показаниям или в соответствии с личными предпочтениями космонавты использовали индивидуальный протокол локомоторных тренировок, составленный в соответствии с основными принципами российской системы профилактики. На начальном периоде полета (до 10-х суток) космонавты выполняли физические тренировки с нагрузкой до 50% от рекомендованной. Это обусловлено адаптационной перестройкой систем, обеспечивающих физическую работоспособность на раннем этапе полета.

Локомоторные тренировки на дорожке БД-2 для космонавтов планировались в соответствии с бортовой документацией, протоколы тренировок соответствовали схеме, разработанной в модельном эксперименте с АНОГ (Степанцов и др., 1972). Согласно бортовой документации, в четвертый день микроцикла локомоторные тренировки не выполняются, микроцикл может начинаться заново, либо космонавт выполняет личный протокол. В нашей выборке 8 космонавтов в четвертый день микроцикла выполняли тренировки по личному протоколу, 5 космонавтов предпочитали трехдневный микроцикл (вместо дня отдыха начинали следующий микроцикл). Рекомендованная величина осевой нагрузки при выполнении тренировок на бегущей дорожке составляла 70 % от веса тела, и в основном космонавты следовали этой рекомендации. Однако наблюдались и исключения из этого правила, по медицинским показаниям величина осевой нагрузки могла снижаться, и нижний предел для нашей выборки составил 47% от веса тела на Земле, а один из космонавтов на заключительном этапе полета по примеру партнеров по МКС повышал эту величину до 87%. Рекомендованная доля пассивного режима движения полотна дорожки за тренировку различалась по дням микроцикла, составляя в среднем 30% за 3 дня. Величина дистанции, пройденной за тренировку, также различалась по дням микроцикла и составляла в различные дни от 3000 до 6000 м. Высокая вариативность в величине осевой нагрузки по вертикальной оси тела, доле пассивного режима и дистанции тренировок обусловлена ограничением

возможностей регламентирования тренировочного процесса в условиях реального космического полета.

На заключительном этапе полета физические тренировки на дорожке планировались дважды в день. Вторая тренировка выполнялась по протоколу первого дня микроцикла, так как, согласно данным анализа результатов ДКП на российских станциях, именно этот режим способен обеспечить повышение ортостатической устойчивости и нормализацию сосудистого тонуса. При выполнении локомоторных тренировок и нагрузочных тестов все космонавты использовали тренировочно-нагрузочный костюм, который обеспечивал вертикальную осевую нагрузку, чтобы стабилизировать положение на беговой дорожке и частично имитировать действие гравитационных сил.

Силовые тренировки с использованием американского тренажера ARED космонавты выполняли через день. В процессе тренировки они применяли два протокола, включавшие разные комплексы упражнений. Каждый протокол включал в себя упражнения для мышц ног («Приседания» и «Подъемы на носки»). Величину «весового нагружения» в этих упражнениях каждому члену экипажа подбирали индивидуально. Космонавты использовали величину «весового нагружения» от 70% до 120% от веса тела на Земле и выполняли по 16–20 повторений в 3–4 подхода. Каждые 3 недели полета происходила коррекция параметров нагрузки в зависимости от уровня силовой подготовленности. Если космонавт справлялся с рекомендованной нагрузкой, то применяли волнообразный метод, т.е. 2–3 раза увеличивали величину «весового нагружения» (примерно на 10%), затем добавляли четвертый подход в упражнениях для мышц ног и спины. Затем рекомендовалось снизить величину «весового нагружения» до исходного уровня и на заключительном этапе полета увеличивали величину «весового нагружения» до максимальных значений, применявшихся в ходе полета.

Физические тренировки космонавта в годовом полете планировались в соответствии со стандартной российской программой профилактики 2 раза в день, общей продолжительностью 150 мин в сутки. Ежедневно планировались

тренировки на дорожке БД-2, а также тренировки на велотренажере и силовом тренажере с чередованием через день. Локомоторные тренировки выполнялись по четырехдневному микроциклу. Величина осевой нагрузки составила в среднем за весь полет 63,6 % от веса тела космонавта. Протоколы локомоторных тренировок в большей степени включали в себя бег в интервальном режиме, при этом около 20% его объема было выполнено в пассивном режиме движения полотна (передвижение полотна бегущей дорожки усилием ног), остальной объем был представлен бегом в активном режиме.

Силовые тренировки с использованием американского тренажера ARED космонавт выполнял через день. В процессе тренировки выполнялись два протокола, включавшие разные комплексы упражнений. Согласно полученным данным, нагрузка при выполнении резистивных упражнений соответствовала рекомендованной. В основных силовых упражнениях, таких как приседания, подьёмы на носки и становая тяга, относительная нагрузка к концу полета составляла 134 %, 146 % и 93 % от массы тела, соответственно.

Состав научной аппаратуры

Бегущая дорожка «БД-2» (ИМБП) (штатное средство МКС) обеспечивает выполнение локомоторных тренировок и тестирований.

Тренировочно-нагрузочный костюм «ТНК-У-1-М» (штатное средство МКС) предназначен для выполнения ФУ на бегущей дорожке, обеспечивая диапазон величин осевой нагрузки на тело космонавтов.

Комплект «Кардиокассета-2010» (ИМБП) (штатное средство МКС) предназначен для регистрации электрокардиограммы (ЭКГ) космонавта в 3 стандартных отведениях во время космического полета.

Эргоспирометр «Oxycon Mobile» (Erich Jaeger, Viasys Healthcare, Germany) обеспечивал регистрацию параметров газообмена методом «breath-by-breath» в предполетном и послеполетном периоде.

Комплекс «Метабол» (ИМБП, Россия), был предназначен для определения в ходе длительных космических полетов метаболического статуса организма в

покое и при физических нагрузках на основе контроля респираторных параметров. В работе приведены данные частоты дыхания.

Комплекс «Миограф» (Биофизприбор, Санкт-Петербург, Россия). В рамках эксперимента «Профилактика-2» комплекс «Миограф» использовался для регистрации электромиограммы мышц нижних конечностей. Полоса пропускания составляла 10–1000 Гц, уровень собственных шумов, подаваемых на вход канала, составлял менее 5 мВ, коэффициент подавления синфазного сигнала составлял не менее 90 дБ, диапазон входных сигналов составлял 15–20 мВ. Частота дискретизации в аналогово-цифровом преобразователе составляла 5000 Гц.

Комплект «Лактат» (ИМБП) предназначен для измерения содержания лактата в капиллярной крови (ЛК) человека в условиях длительного космического полёта на РС МКС.

Экспериментальные сессии состояли из двух видов нагрузочных тестов.

1) Тест индивидуальной стратегии (ТИС) (рисунок 1) включает определение кинетики функционирования кардиореспираторной системы и индивидуальных стратегий локомоций. Это ступенчатый локомоторный тест на бегущей дорожке с регистрацией данных газоанализа (до и после полета — на эргоспирометре «Охусон Mobile»), ЭКГ и скорости локомоций, определением концентрации лактата в капиллярной крови перед нагрузкой в покое и после теста на 1-й и 5-й минуте восстановительного периода. Тест состоит из двух частей (рисунок 1).

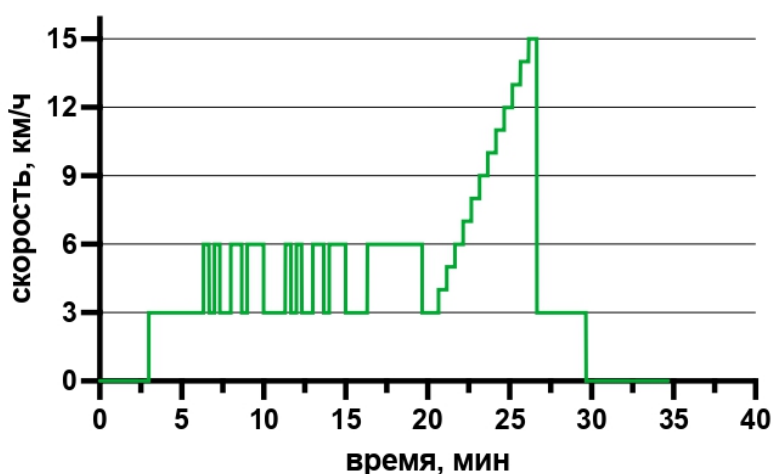


Рисунок 1 — Протокол ТИС

Первая часть теста включает в себя чередование ходьбы со скоростью 3 км/ч и 6 км/ч в форме псевдорандомизированной двоичной последовательности. Первая часть протокола ТИС предназначена для разминочной части перед основной нагрузкой. Вторая часть теста представлена ступенчато-возрастающей нагрузкой от 3 до 15 км/ч с приращением скорости на 1 км/ч каждые 30 с. Оценка уровня функциональных резервов осуществлялась только во второй части теста. ТИС в условиях космического полета применялся впервые после экспериментальной отработки в наземных экспериментах. ТИС выполнялся за 60–30 суток до космического полета, на 55 ± 13 , 98 ± 15 , 123 ± 8 , 148 ± 8 сутки КП и после полета на 10 ± 2 сутки.

2) Ступенчатый локомоторный тест по протоколу МО-3 (рисунок 2) в пассивном режиме работы бегущей дорожки БД-2 с регистрацией пЭМГ мышц голени и бедра, ЭКГ, скорости локомоций, определением концентрации лактата капиллярной крови перед нагрузкой в покое и после теста на 1-й и 5-й минуте восстановительного периода. Тест МО-3 включает в себя следующие ступени: начальная ходьба со скоростью 3–5 км/ч в течение 3 минут, медленный бег со скоростью 6–8 км/ч в течение 2 минут, средний бег со скоростью 8–10 км/ч в течение 2 минут, быстрый бег со скоростью 10–12 км/ч в течение 1 минуты, заминочная ходьба со скоростью 3–5 км/ч в течение 3 минут.

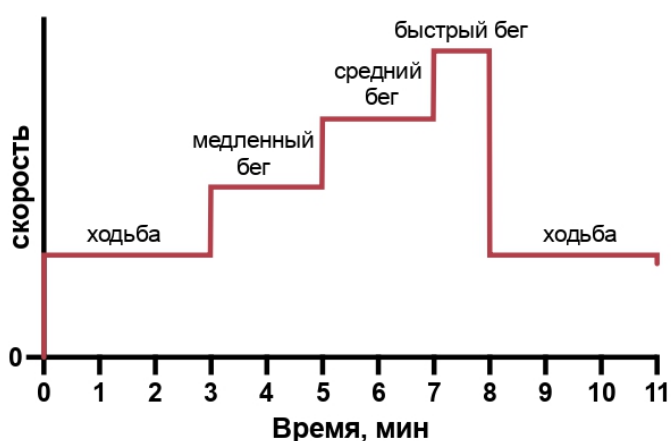


Рисунок 2 — Протокол штатного ступенчатого теста МО-3

Тест МО-3 выполнялся за 60–30 суток до КП, на 12 ± 2 , 38 ± 7 , 56 ± 6 , 91 ± 9 , 132 ± 18 сутки КП. После полета МО-3 выполнили два космонавта на 15 сутки.

Меры безопасности

При выполнении эксперимента обследуемые строго следовали указаниям бортовой инструкции для космического эксперимента. Вся аппаратура отвечала требованиям безопасности проведения эксперимента.

При выполнении полетной процедуры взятия капиллярной крови соблюдались правила асептики, являющиеся составной частью процедур, которым обучают операторов в предполетном периоде. Перед космическим полетом каждый космонавт проходил предполетное обучение по проведению эксперимента (работа с оборудованием, определение точек прикрепления электродов, забор крови, передача научных данных).

Положения эксперимента «Профилактика-2» рассмотрены на заседании №368 от 22 августа 2014 года Комиссии ИМБП по биомедицинской этике — физиологической секции Российского Национального Комитета по Биоэтике РАН. По заключению Комиссии эксперимент не противоречит нормам биомедицинской этики и квалифицируется как эксперимент с допустимым риском. Все испытуемые подписали (в соответствии с Хельсинкской декларацией) информированное согласие на участие в эксперименте.

Экспериментальные группы

Разница в сроках проведении послеполетного обследования в ТИС позволила сформировать две экспериментальные группы. Группу А представляли космонавты, выполнившие ТИС на 9 сутки после КП ($n=4$), в группе Б выполнение ТИС производилось на 12 сутки после КП ($n=5$). Дополнительно космонавты были разделены на группы В и Г на основании времени выполнения послеполетного обследования в ТИС (группа В из 7 космонавтов, выполнивших ТИС на 9–10 сутки после КП и группа Г из 7 космонавтов, выполнивших тест на 12–13 сутки после КП). Прежде всего было проведено сравнение изучаемых параметров между этими группами в периоде до полета. В ТИС значимых изменений всех исследуемых показателей до КП между группами выявлено не было.

С целью определения информативности ТИС в оценке и прогнозировании уровня функциональных резервов и способности к их включению после ДКП космонавты были разделены на две группы, в которых значительно различались пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления на завершающем этапе полета (140–156 сутки). В группе Д пульсовая сумма работы (17897 ± 529 уд.) оказалась на 19,4% выше, чем в группе Е (14678 ± 3148 уд.) ($p=0,009$). Пульсовая сумма восстановления на заключительном этапе полета в группе Д оказалась выше, чем в группе Е (2838 ± 188 и 2181 ± 490 уд., $p=0,009$). Мы предположили, что ТИС позволит оценить динамику уровня функциональных резервов организма в экспериментальных группах. Согласно нашему предположению, в группе космонавтов с более низкими пульсовыми суммами во время полета уровень функциональных резервов после полета будет выше.

Обработка полученных данных

Абсолютные значения ЧСС являются информативными в узком диапазоне физических нагрузок с аэробным механизмом энергообеспечения мышечной деятельности. Оценка состояния аэробных и анаэробных механизмов энергообеспечения в спортивной медицине выполняется на основе дополнительных пульсовых показателей. В нашем исследовании рассчитывались такие показатели, как пульсовая сумма работы (площадь под кривой ЧСС за весь период работы в ТИС), пульсовая сумма восстановления (площадь под кривой ЧСС за время восстановления в течение 5 минут после ТИС), и пульсовая сумма покоя (площадь под кривой ЧСС за время покоя в течение 5 минут перед ТИС) (рисунок 3).

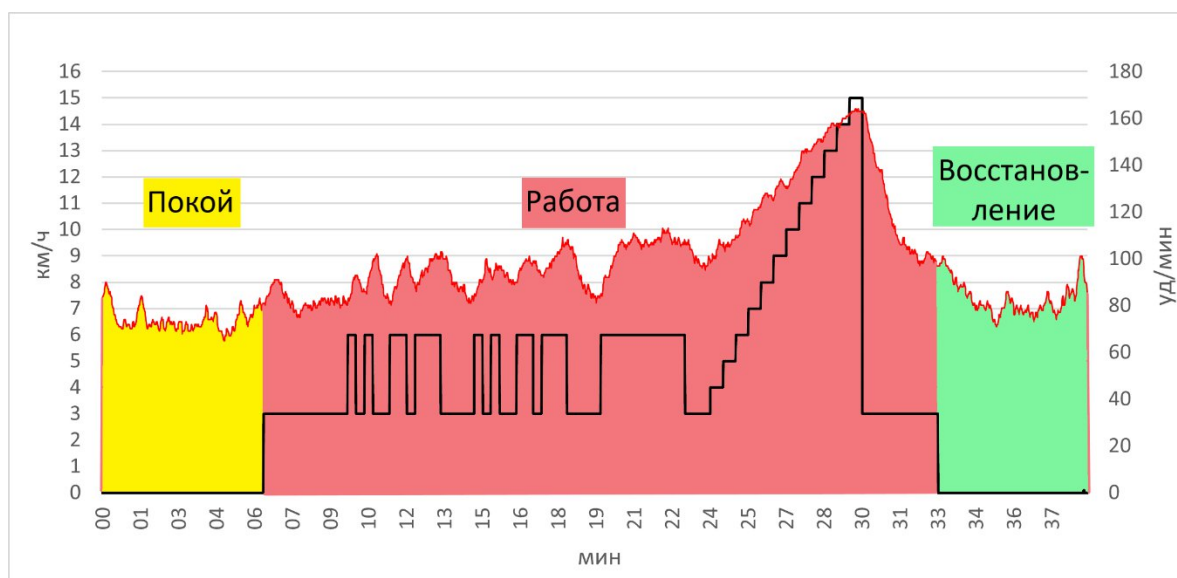


Рисунок 3 — Схема расчета пульсовых сумм в ТИС

В тесте МО-3 рассчитывались показатели физиологической стоимости (ФС) (1) и физиологической нагрузки (ФН) (2), учитывающие скорость локомоций, ЧСС и величину осевой нагрузки по формулам:

$$ФС = \Delta ЧСС / (V * L) \text{ (Фомина, и др., 2018),} \quad (1)$$

где:

ФС — физиологическая стоимость нагрузки,

$\Delta ЧСС$ — разность ЧСС при нагрузке и в состоянии покоя,

V — скорость локомоций (км/ч),

L — величина осевой нагрузки, создаваемой ТНК в космическом полете (в % от веса тела).

Во всех полетных сессиях физиологическая стоимость нагрузки оказывается выше, чем на Земле, так как в формуле не учитывается вес человека на Земле. Очевидно, что проведение теста на работоспособность в условиях Земли требует перемещения тела со 100% вертикальной осевой нагрузкой, а в условиях невесомости с нагрузкой лишь 70%. Таким образом, нами было предложено модифицировать формулу и ввести показатель — физиологическая нагрузка.

Показатель физиологическая нагрузка, по нашему мнению, позволит более точно отражать динамику физической работоспособности.

$$\Phi H = \Delta ЧСС / V * W, (2)$$

где:

ΦH — физиологическая нагрузка,

V — скорость локомоций (км/ч),

W — вес (кг) в условиях Земли, или

W — осевая нагрузка, создаваемая ТНК в полете или масса тела в условиях Земли (кг).

Стандартность нагрузки ТИС позволила ввести показатель — пульсовой долг. Пульсовой долг в ТИС рассчитывался как разность количества сердечных сокращений в периоде восстановления и количества сердечных сокращений в состоянии относительного покоя. Этот показатель является отражением физиологических и метаболических перестроек, сопровождающих включение функциональных резервов при выполнении физической нагрузки.

Также рассчитывался такой показатель, как $\Delta ЧСС$, или хронотропный резерв сердца, который отражает разность между максимальной ЧСС и ЧСС в покое (Pisano et al., 2020, Ciampi et al., 2021). Достоверное увеличение экономичности работы сердца и меньший прирост ЧСС в ответ на стандартную физическую нагрузку является способом описания динамики уровня функциональных резервов в физической культуре и спорте. Большое диагностическое значение имеет и неадекватно малый прирост ЧСС при физической нагрузке, который получил название хронотропной недостаточности. Появление признаков хронотропной недостаточности часто свидетельствует о состоянии «перетренированности», которое сопровождается нарушением функции левого желудочка (Похачевский и др., 2017). Разность между

максимально достигнутой и исходной ЧСС (т. н. хронотропный резерв сердца) у условно здоровых лиц в среднем составляет 85–90 уд/минуту (Гаджиева и др., 2015). Можно сказать, что существует U-образная зависимость, когда слишком большое и слишком малое изменение ЧСС в ответ на нагрузку является негативным признаком. Показатели ЧСС, Δ ЧСС, скорости, физиологической стоимости в данном тесте рассчитывались каждые 10 секунд теста.

В клинических исследованиях при проведении теста на дорожке часто используется единица мощности — (метаболическая единица ME или метаболический эквивалент MET). Это кратность потребления кислорода на высоте нагрузки к его потреблению в покое (Jetté et al., 1990). В данном исследовании уровень потребления кислорода в покое был зарегистрирован непосредственно перед тестом в положении стоя, а значение MET рассчитывалась аналогично — как отношение потребления O_2 /кг/мин на высоте нагрузки (бег 15 км/ч) к потреблению O_2 /кг/мин в покое.

До и после полета фиксировали скорость локомоций и ЧСС во время достижения анаэробного порога графическим методом (Wasserman et al., 1987). В работе использовался показатель кислородный пульс (отношение потребления кислорода к ЧСС) и дыхательный коэффициент (ДК) (отношение уровня выделения CO_2 к уровню потребления O_2).

Поверхностная электромиография (пЭМГ)

Образцы пЭМГ во всех точках исследования были получены благодаря комплексу для регистрации ЭМГ «Миограф» с m.soleus правой нижней конечности с помощью самоклеящихся покрытых гелем Ag/AgCl защелкивающихся адгезивных электродов (H124SG, диаметр 24 мм, Kendall-ARBO, Германия), расположенных бок о бок над брюшком мышцы. Перед прикреплением электродов кожу обрабатывали спиртовыми салфетками. Для анализа пЭМГ были взяты 10 шагов на каждой ступени ходьбы или бега. Репрезентативные образцы пЭМГ, полученные при каждой скорости локомоций, представлены на рисунке 4. Отчетливо видны всплески активности пЭМГ, разделенные периодами изолинии, что позволило считать качество сигнала

соответствующим. Однако визуальный осмотр каждой записи при усилении заставил отказаться от некоторых записей, зашумленных из-за движений кабеля или из-за нарушения контакта электрода с кожей во время бега.

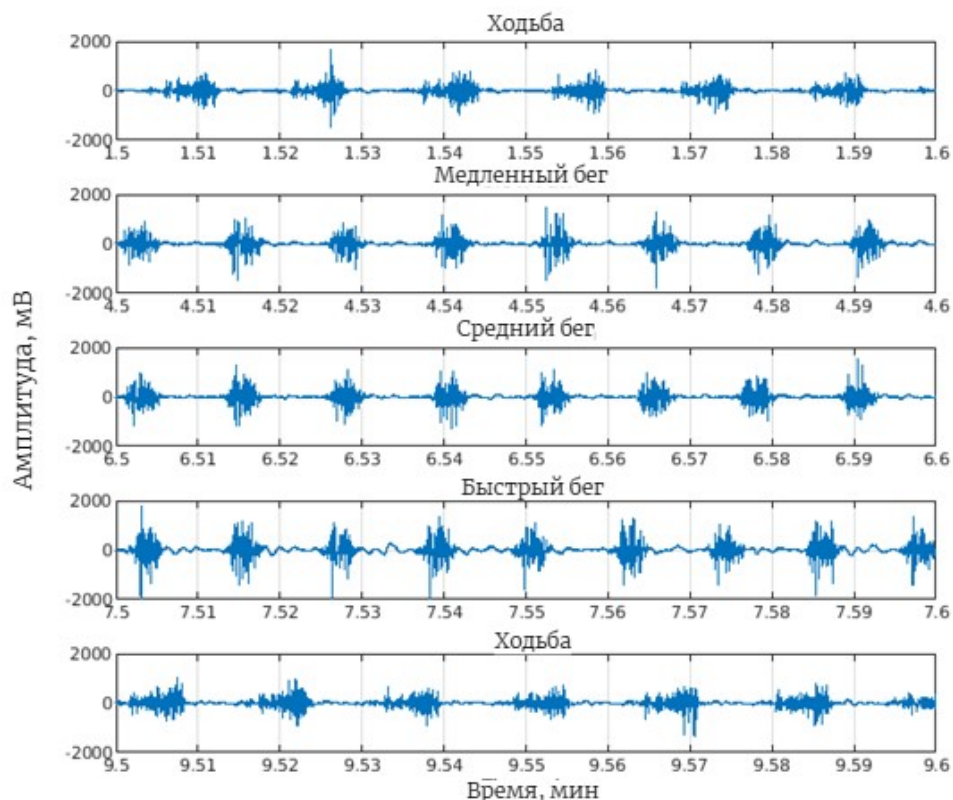


Рисунок 4 — Примеры записи пЭМГ, полученные с периодом 10 с для всех исследуемых временных интервалов

Предварительная обработка записей пЭМГ

Выбор периодов с активностью пЭМГ для дальнейшего анализа был выполнен автоматически с последующей ручной коррекцией. Для каждой скорости локомоций было определено пороговое значение, превышение амплитуды сигнала пЭМГ этого значения рассматривалось как признак мышечной активации. Когда последовательные значения пЭМГ были меньше, предполагалось, что активация мышц закончилась. Значения средней амплитуды и частоты были определены отдельно для каждой скорости локомоций методом визуального анализа кривой и сопоставления по времени с данными, полученными с бегущей дорожки. Пороговое значение было выбрано выше

амплитуды пЭМГ в период мышечного расслабления, но меньше ее пиковых значений в период активности. Это значение увеличивается с приращением скорости локомоций, потому что во время расслабления мышцы амплитуды шума пЭМГ также увеличиваются (рисунок 4).

Были вычислены временные ряды из 10 шагов пЭМГ на каждом интервале скорости для изучения линейных и нелинейных параметров. Из линейных параметров были рассчитаны средняя амплитуда (мкВ) и средняя частота (Гц), а из нелинейных — аппроксимированная энтропия.

Амплитуда пЭМГ. Для анализа амплитуды были выбраны пики абсолютных значений ЭМГ. Пиковые значения, превышающие определенное пороговое значение, использовались для среднего значения амплитуды. Порог был определен на уровне 50–100 мкВ. Таким образом, средняя амплитуда была рассчитана как среднее значение всех пиков пЭМГ в пределах вышеупомянутого диапазона.

Частота пЭМГ. Средняя частота была вычислена с помощью встроенной функции быстрого преобразования Фурье с использованием пакета Matlab.

Аппроксимированная энтропия, представляющая меру сложности или неопределенности сигнала, была вычислена также посредством встроенной функции в среде Matlab. В результате энтропия отражается в единственном числе, которое отражает предсказуемость будущих значений в сигнале на основе предыдущих значений.

Статистическая обработка данных

Статистическая обработка данных выполнялась в программах «Statistica 12», «SPSS 21.0» (IBM, США) и «Minitab 19.1» (США) и включала построение распределений, определение нормальности распределений методом Шапиро-Уилка, расчет индивидуальных средних значений и дисперсии показателей (one-way ANOVA). Статистически значимыми результаты считались при $p < 0,05$ по критерию Фишера (метод группирования выборок с наименее значимой разницей). Распределение космонавтов на группы производилось посредством

иерархического кластерного анализа полученных данных и построения кластеров методом Варда в программе «Statistica 12».

Расчет всех параметров пЭМГ был выполнен с помощью Matlab (Natic, США). Для оценки влияния фактора состояния и фактора скорости локомоций на изучаемый сигнал пЭМГ применялась общая одномерная линейная модель. Кроме того, была проверена разница между ступенями (начальная ходьба и заминочная ходьба в тесте МО-3) для выявления признаков «мышечного утомления» с помощью парного Т-критерия Вилкоксона. Корреляционный анализ между изучаемыми параметрами и факторами проводился с использованием критерия Спирмена.

ГЛАВА 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Новые подходы к мониторингу состояния систем вегетативного обеспечения мышечной деятельности в условиях орбитального полета

3.1.1 Изменение уровня функциональных резервов в ходе длительного космического полета по результатам теста МО-3

Наиболее информативной является ступень быстрого бега в тесте МО-3, так как именно на этой ступени регистрируется максимальная ЧСС, а в результате повышения нагрузки энергообеспечение мышечной деятельности осуществляется при активном участии анаэробного механизма (Козловская и др., 2001). В среднем за 11 минут теста участники эксперимента преодолевали дистанцию в 1059 ± 170 м. Средняя скорость локомоций на ступени быстрого бега на 10–14 сутки полета (острый период адаптации) составила $8,1 \pm 2,6$ км/ч, что по сравнению с предполетными данными ($8,8 \pm 2,5$ км/ч) было значимо ниже (рисунок 5).

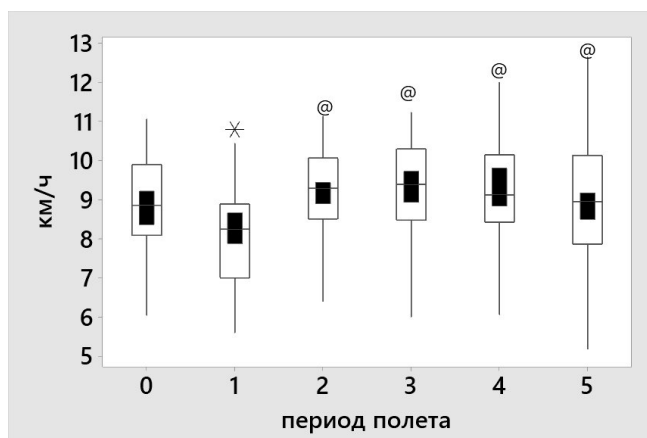


Рисунок 5 — Скорости быстрого бега при выполнении теста МО-3, n=14 (0 - до КП, 1 — на 10–14 сутки, 2 — на 31–45 сутки, 3 — на 50–62 сутки, 4 — на 82–100 сутки, 5 — на 114–150 сутки);

«*» — по сравнению с предполетным значением $p < 0,05$,

«@» — по сравнению с первым периодом полета значение $p < 0,05$

Однако уже во второй полетной сессии наблюдается значимое возрастание скорости быстрого бега до $9,1 \pm 2,7$ км/ч. Это может свидетельствовать о завершении раннего адаптационного периода и отражает динамику изменений уровня функциональных резервов в течение первого месяца пребывания в условиях невесомости на фоне применения методов российской системы профилактики.

Средний уровень вертикальной осевой нагрузки в начальном периоде ДКП в тесте МО-3 у космонавтов составлял $52,3 \pm 3,4$ кг с достаточно большими индивидуальными различиями (рисунок 6), что соответствует в среднем 61,4% от веса тела космонавтов на Земле. В остальных периодах полета средний уровень вертикальной осевой нагрузки в тесте МО-3 составлял $55,5 \pm 11,3$ кг, что соответствует в среднем 65,7% от веса тела космонавтов на Земле в фоновом исследовании. Увеличение вертикальной осевой нагрузки после начального периода полета рекомендуется специалистами по системе профилактики гипогравитационных нарушений для увеличения величины тренировочного стимула. Таким образом, уровень вертикальной осевой нагрузки в обследованной группе космонавтов был ниже 70% от веса тела на Земле.

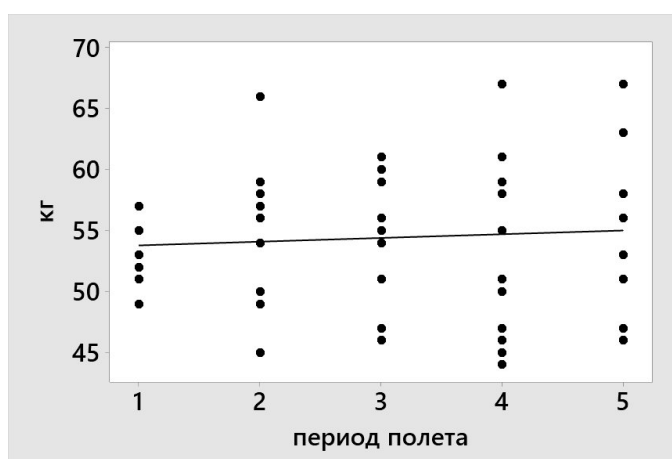


Рисунок 6 — Индивидуальные показатели величины вертикальной осевой нагрузки (в кг) в ходе ДКП в группе обследованных космонавтов (1 — на 10–14 сутки, 2 — на 31–45 сутки, 3 — на 50–62 сутки, 4 — на 82–100 сутки, 5 — на 114–150 сутки)

В предполетном периоде ЧСС была выше, чем в полете и составила 166 уд/мин (рисунок 7). В ходе полета динамика ЧСС на ступени быстрого бега в МО-3 находилась в диапазоне 161–165 уд/мин.

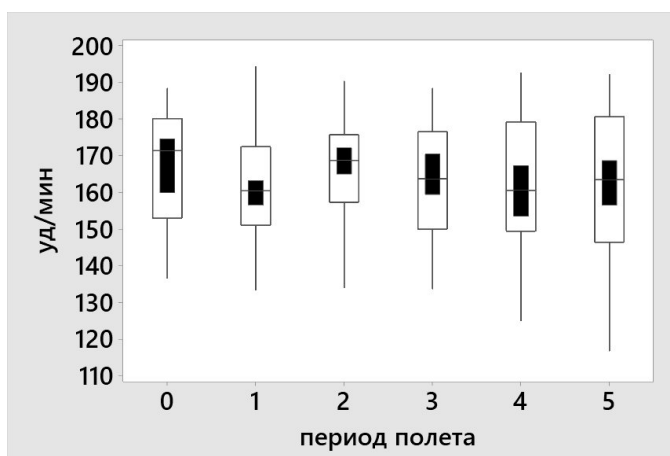


Рисунок 7 — Частота сердечных сокращений на ступени быстрого бега при выполнении теста МО-3 (0 — до КП, 1 — на 10–14 сутки, 2 — на 31–45 сутки, 3 — на 50–62 сутки, 4 — на 82–100 сутки, 5 — на 114–150 сутки)

Нами был рассчитан традиционный для гравитационной физиологии показатель - физиологическая стоимость нагрузки. До полета она составила $10,9 \pm 4,3$ усл.ед. (рисунок 8). Во всех полетных сессиях физиологическая стоимость нагрузки оказалась выше, чем до полета, в частности, в первой полетной сессии она составляла $17,9 \pm 6,0$ усл.ед., а во второй полетной сессии — $16,6 \pm 4,6$ усл.ед. В ходе полета физиологическая стоимость нагрузки по сравнению с первой полетной сессией была значимо ниже во всех полетных сессиях. При формировании вывода о результатах анализа показателя физиологической стоимости нагрузки необходимо учитывать, что в ходе полета нагрузка определялась не только скоростью локомоций, но и уровнем вертикальной осевой нагрузки. При этом в условиях Земли осевая нагрузка равна весу тела, а в полете находится в диапазоне от 60 до 70 процентов от веса тела на Земле.

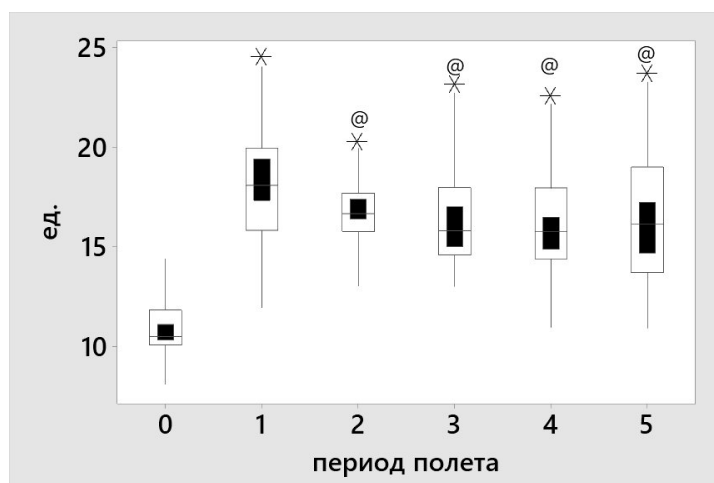


Рисунок 8 — Физиологическая стоимость нагрузки на ступени быстрого бега при выполнении теста МО-3 (0 — до КП, 1 — на 10–14 сутки, 2 — на 31–45 сутки, 3 — на 50–62 сутки, 4 — на 82–100 сутки, 5 — на 114–150 сутки).

«*» — по сравнению с предполетным значением $p < 0,05$, «@» — по сравнению с первым периодом в полете $p < 0,05$

Предложенный нами показатель «физиологическая нагрузка», расчет которого подробно описан в главе «Методика исследования», отражает эргономические закономерности бега на дорожке в условиях космического полета (рисунок 9). Физиологическая нагрузка учитывает в расчете массу тела и вертикальную осевую нагрузку в кг. Во всех полетных сессиях физиологическая нагрузка оказалась ниже, чем в условиях Земли. Наблюдалось снижение физиологической нагрузки в ходе адаптации к условиям невесомости по сравнению с предполетным значением, что имеет очевидный физиологический смысл — работа при снижении вертикальной осевой нагрузки на 30% приводит и к снижению физиологической стоимости нагрузки.

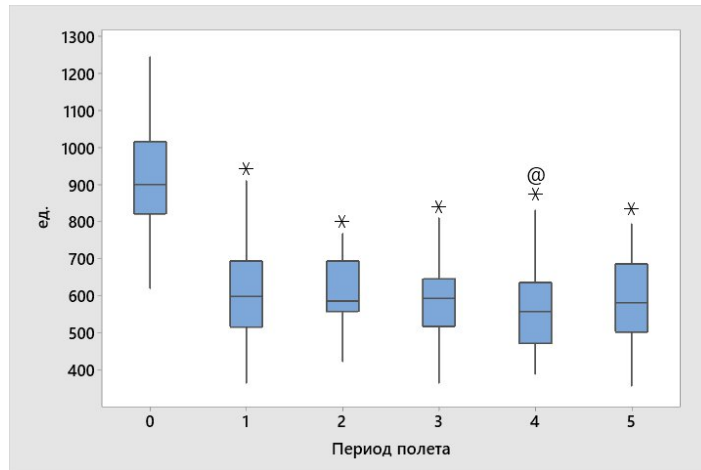


Рисунок 9 — Физиологическая нагрузка на ступени быстрого бега при выполнении теста МО-3 (0 — до КП, 1 — на 10–14 сутки, 2 — на 31–45 сутки, 3 — на 50–62 сутки, 4 — на 82–100 сутки, 5 — на 114–150 сутки).

«*» — по сравнению с предполетным значением $p < 0,05$,

«@» — по сравнению с первым периодом полета $p < 0,05$

Послеполетный тест МО-3 в этом эксперименте в связи с медицинскими ограничениями выполнили только 2 космонавта. Послеполетная скорость локомоций в тесте МО-3 на ступени быстрого бега составила $8,0 \pm 3,4$ км/ч, что на 13% ниже предполетных значений ($9,4 \pm 3,6$ км/ч). Физиологическая стоимость нагрузки после полета составила $13,8 \pm 8$ усл.ед., что на 13% выше по сравнению с предполетными значениями ($11,9 \pm 8$ усл.ед.). Физиологическая нагрузка после космического полета значимо не изменилась. Таким образом, у двух космонавтов, прошедших послеполетное тестирование, данные демонстрируют снижение уровня функциональных резервов после космического полета. Высокие требования к функциональному состоянию систем, обеспечивающих выполнение локомоций в пассивном режиме движения полотна беговой дорожки не позволили другим космонавтам участвовать в обследовании, что еще раз доказывает необходимость использования теста в активном режиме движения полотна беговой дорожки, что и было учтено при разработке ТИС.

3.1.2 Динамика функциональных резервов космонавтов по результатам теста «Индивидуальные стратегии»

В данном разделе рассматриваются результаты, полученные в ходе апробации в условиях КП нового локомоторного теста на оценку состояния функциональных резервов гравизависимых систем. Его принципиальные различия со штатным тестом МО-3 приведены в главе «Материалы и методы». В разделе приведены результаты обследования в ТИС до, во время и после ДКП ($n=10$). Во всех сессиях эксперимента, подвергнутых статистической обработке и приведенных в данной работе, космонавты выполнили весь протокол теста. Случаи, когда космонавты после полета не могли достигнуть максимальной скорости 15 км/ч, предписанной протоколом теста по медицинским показаниям, и тест был завершён раньше (Фомина и др., 2019), исключены из выборки, анализируемой в работе. ТИС выполнялся за 30 суток до КП, 4 раза во время КП и на $10(\pm 2)$ сутки после КП.

В результате анализа полученных данных ТИС, 85% от максимальной возрастной ЧСС было достигнуто практически во всех случаях. Таким образом, предложенный тест можно отнести к субмаксимальной нагрузке на момент наземного тестирования. Исключениями стали обследование в ТИС одного космонавта до полета (ЧСС достигла лишь 77% от максимальной), и еще одного космонавта после полета (ЧСС достигла 81% от максимальной).

Зарегистрировано снижение уровня пиковой ЧСС во всех полетных сессиях (рисунок 10), это может объясняться сниженной вертикальной осевой нагрузкой. В ходе полета показатель пиковой ЧСС значимо не изменялся, хотя имелась тенденция к снижению этого показателя во втором тесте в полете. В целом уровень пиковой ЧСС в ходе КП соответствует U-образной динамике изменений. ЧСС на всех ступенях нагрузки в полетных сессиях значимо ниже, чем до космического полета. ЧСС в ТИС на каждой из ступеней теста оказалась ниже по сравнению с фоновыми значениями в первом тестировании в полете (42–86 сутки КП) на ступенях с 9–13 км/ч и 15 км/ч. Во втором тестировании в полете (83–113 сутки КП) ЧСС снизилась на ступенях с 7–15 км/ч. В третьем тестировании в

полете (115–131 сутки) ЧСС оказалась снижена на ступенях 8–15 км/ч. В четвертом тестировании в полете ЧСС снизилась на ступенях с 9 по 15 км/ч.

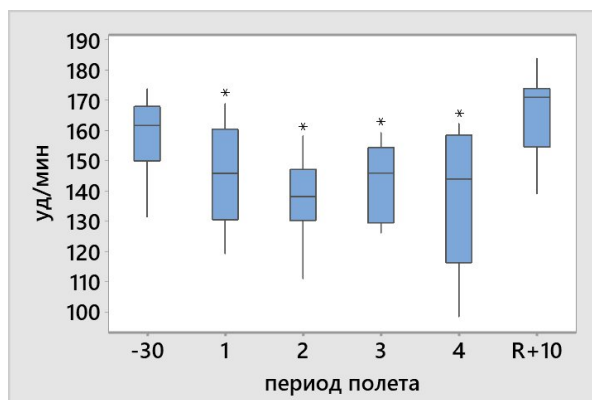


Рисунок 10 — Уровень пиковой ЧСС в ТИС до, во время и после космического полета. (-30 – 30-е сутки до полета; 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки; R+10 — 10-е сутки после полета).

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

После КП частота сердечных сокращений увеличилась на всех ступенях нагрузки с 5–11 км/ч по сравнению с предполетными значениями (рисунок 11). Этот факт обусловлен необходимостью включения функциональных резервов гравитационно-зависимых систем и, в частности, сердечно-сосудистой системы в ранний период реадaptации после космического полета.

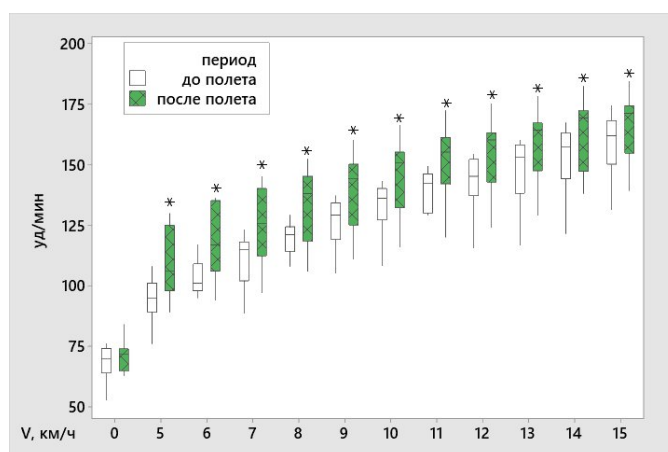


Рисунок 11 — ЧСС в ТИС до и после космического полета.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Значение темпа прироста ЧСС (показатель ЧСС на каждой ступени в процентном соотношении к ЧСС в состоянии покоя) до и после полета значимо не различалось, но имелась тенденция к его снижению после КП на последних

ступенях теста. В ходе полета прирост ЧСС на каждой ступени нагрузки по сравнению с фоновыми значениями до полета, был значимо снижен в первом тестировании в полете на ступенях нагрузки с 8–15 км/ч (42–86 сутки КП). Во втором тестировании в полете (83–113 сутки КП) прирост ЧСС увеличился по сравнению с первым тестированием в полете на ступенях локомоций со скоростью от 7 до 15 км/ч. В третьем тестировании в полете (115–131 сутки) прирост ЧСС оказался снижен по сравнению со вторым тестированием на всех ступенях, кроме медленного бега со скоростью 5–8 км/ч. В четвертом тестировании в полете прирост ЧСС снизился по сравнению с третьим тестированием на ступенях с 8 по 15 км/ч. Таким образом, изменения прироста ЧСС в ходе полета отражают протекание механизмов адаптации человека к условиям невесомости на фоне снижения величины вертикальной осевой нагрузки в КП по сравнению с выполнением теста в условиях Земли и работой в зоне аэробных механизмов обеспечения мышечной деятельности.

Хронотропный резерв сердца, или Δ ЧСС до и после КП, у всех космонавтов оказался выше 80%, что отражает адекватную реакцию сердечно-сосудистой системы на нагрузку не только до полета, но и после полета. В ходе космического полета во всех периодах хронотропный резерв оказался ниже фонового значения, что обусловлено снижением уровня вертикальной осевой нагрузки в ходе КП на 30% (рисунок 12).

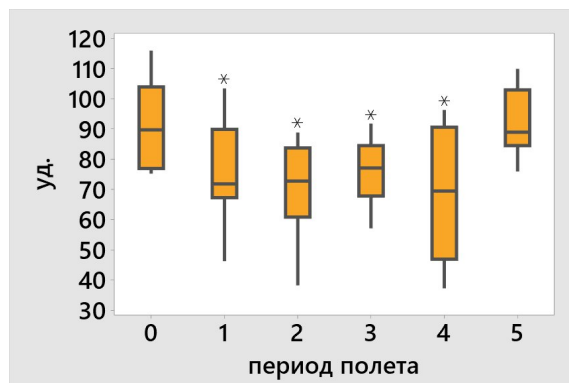


Рисунок 12 — Хронотропный резерв сердца (Δ ЧСС) в ТИС (уд). (0 — до КП, 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки, 5 — 10±2-е сутки после КП).

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

С целью более полной оценки транспортной функции системы кровообращения оценивался кислородный пульс. Этот показатель на двух последних ступенях нагрузки (14 и 15 км/ч) оказался ниже по сравнению с предполетными значениями (рисунок 13), что демонстрирует снижение функциональных резервов кислородтранспортной системы при длительном пребывании в невесомости.

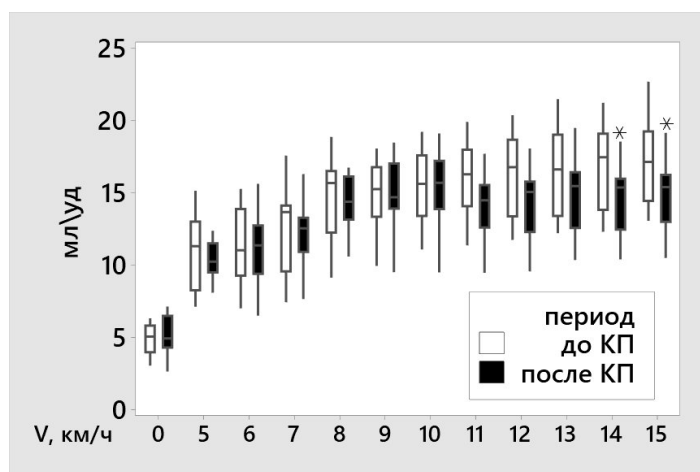


Рисунок 13 — Кислородный пульс (мл/уд) в ТИС до и после космического полета. «*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Частота дыхания (ЧД) в ТИС на последней ступени нагрузки (15 км/ч) при выполнении послеполетного тестирования была значимо выше, чем до полета (рисунок 14).

По сравнению с предполетными данными, ЧД значимо снизилась на всех ступенях нагрузки в первом тестировании в полете (42–86 сутки КП, $n=9$, $p < 0,05$). Во втором тестировании в полете (83–113 сутки КП) ЧД снизилась на всех ступенях, за исключением ступени 7 км/ч. В третьем тестировании (115–131 сутки) ЧД оказалась снижена на всех ступенях, кроме медленного бега со скоростью 5-7 км/ч. В четвертом тестировании в полете ЧД снизилась на ступенях с 8 по 15 км/ч. Изменений этого параметра в ходе полета не наблюдалось. Темп прироста ЧД после космического полета не изменился по сравнению с предполетными данными.

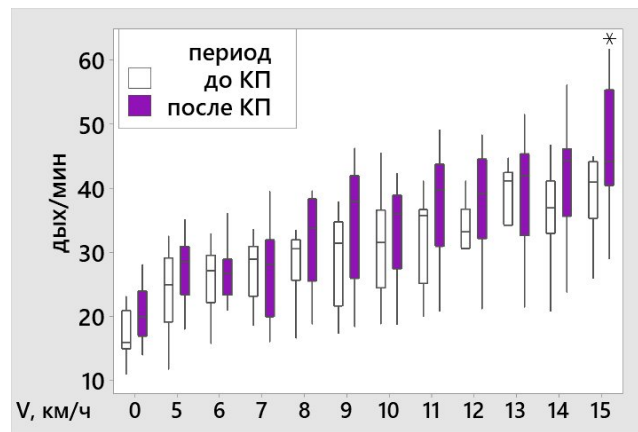


Рисунок 14 — Частота дыхания в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Абсолютные значения потребления кислорода на каждой ступени теста (мл/мин), а также уровень потребления кислорода в расчете на массу тела (мл/мин/кг) в ТИС после космического полета значимо не отличались от фоновых значений (рисунок 15). Однако, имелась тенденция к снижению потребления кислорода на ступенях быстрого бега, в частности, на ступени 15 км/ч потребление кислорода до полета составило 32,4 мл/мин/кг, а после полета снизилось до 29,9 мл/мин/кг ($p=0,17$).

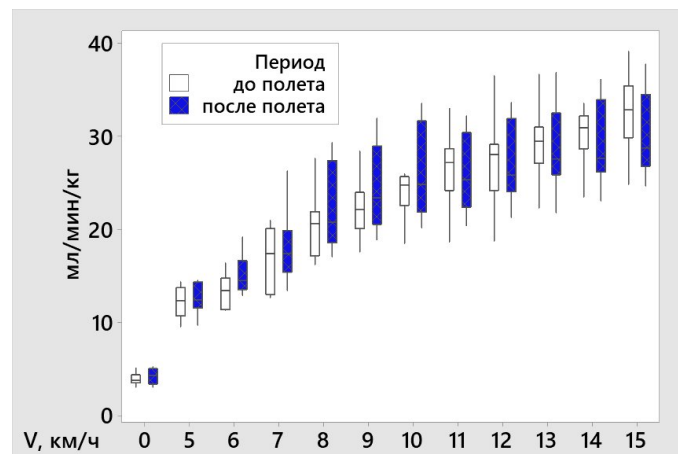


Рисунок 15 — Потребление кислорода (мл/мин/кг) в ТИС до и после КП.

Прирост уровня потребления O_2 на каждой ступени ТИС был рассчитан в относительных величинах по сравнению с состоянием покоя (рисунок 16). Показано, что прирост уровня потребления кислорода по сравнению с предполетным значением оказался ниже после полета на ступенях локомоций со

скоростью 14 и 15 км/ч. По нашему мнению, это связано с гравитационно-зависимыми изменениями в транспортной системе O_2 , обусловленными длительным нахождением в условиях невесомости, и свидетельствует о снижении функциональных резервов кислородтранспортной системы, что согласуется с ранее описанными данными в отношении показателя кислородный пульс.

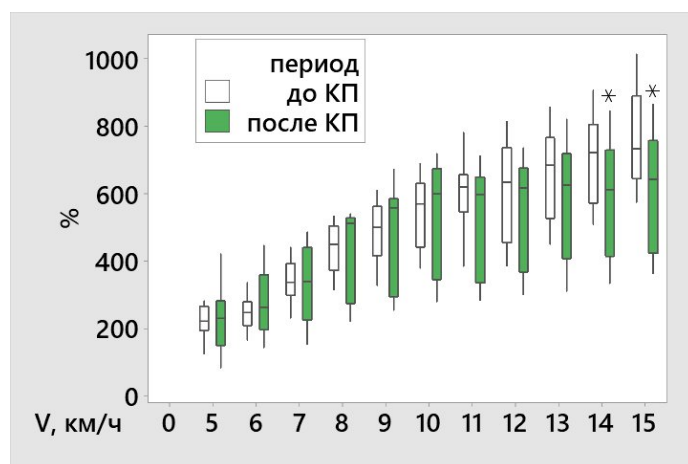


Рисунок 16 — Прирост O_2 (%) в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Расчет метаболического эквивалента нагрузки продемонстрировал снижение после космического полета (до полета $MET=8,5$, после полета $MET=5,9$) (рисунок 17), что еще раз указывает на снижение эффективности работы кислородтранспортной системы и функциональных резервов организма после полета при выполнении стандартной нагрузки.

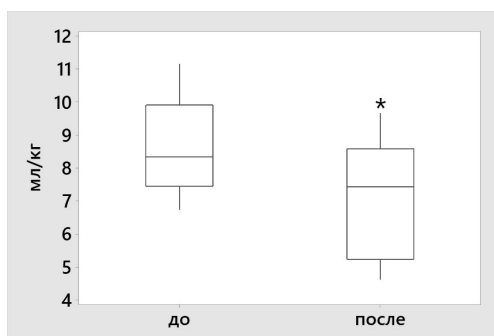


Рисунок 17 — Уровень метаболического эквивалента в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

В целом группа космонавтов, в соответствии с полученными результатами по показателю «метаболический эквивалент», имела высокий или очень высокий уровень толерантности к физической нагрузке в фоновых исследованиях. Метаболический эквивалент после КП значительно снизился у двух космонавтов (на 3,7 МЕТ и 3,5 МЕТ). Интересно отметить, что это были те же космонавты, у которых после КП была снижена реакция сердечно-сосудистой системы (ЧСС, хронотропный резерв сердца, пульсовая сумма работы и восстановления). У одного космонавта из нашей группы после КП показатель метаболического эквивалента оказался на 1 усл. ед. выше, чем до полета. Мы полагаем, что это было обусловлено снижением массы тела космонавта за период космической миссии, поэтому рассматриваем лишь как исключение.

После космического полета значимо был увеличен показатель выделения углекислого газа на ступенях бега со скоростью 8-10 км/ч (рисунок 18). Темп прироста уровня CO_2 по отношению к уровню потребления CO_2 в состоянии покоя после космического полета не показал значимых изменений или тенденций к повышению.

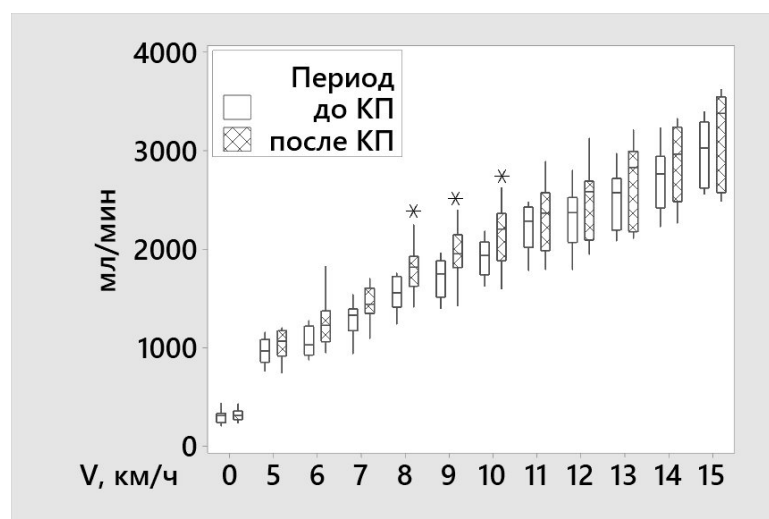


Рисунок 18 — Выделение CO_2 (мл/мин) в ТИС до и после КП. «*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Дыхательный коэффициент в ТИС после космического полета был значимо выше на ступенях бега с 11 км/ч (рисунок 19). Можно предположить, что момент

перехода анаэробного обмена после КП начинался именно со ступени бега со скоростью 11 км/ч.

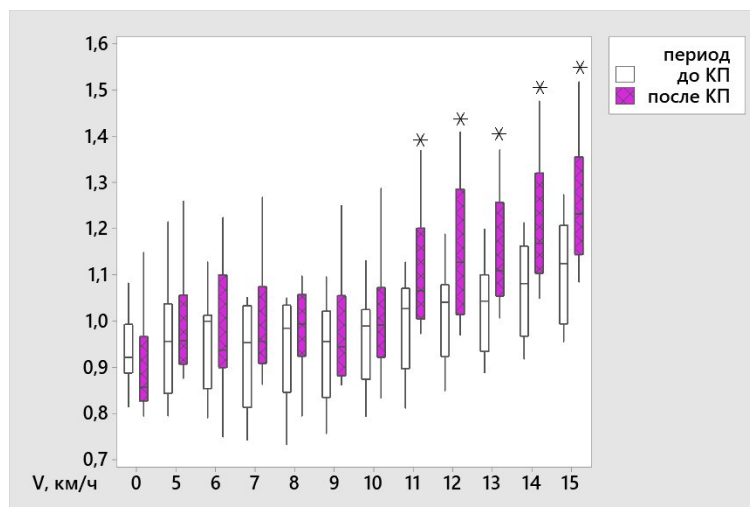


Рисунок 19 — Дыхательный коэффициент в тесте ИС до и после КП.

«*» — $p < 0,05$ в сравнении с предполетным значением

Уровень легочной вентиляции после космического полета оказался повышенным на ступенях бега со скоростью с 9 до 15 км/ч (рисунок 20), хотя темп прироста этого показателя на каждой ступени не изменялся после полета. Данные изменения могут быть связаны с увеличением глубины и частоты дыхания после космического полета вследствие недостатка оксигенации тканей при динамической работе.

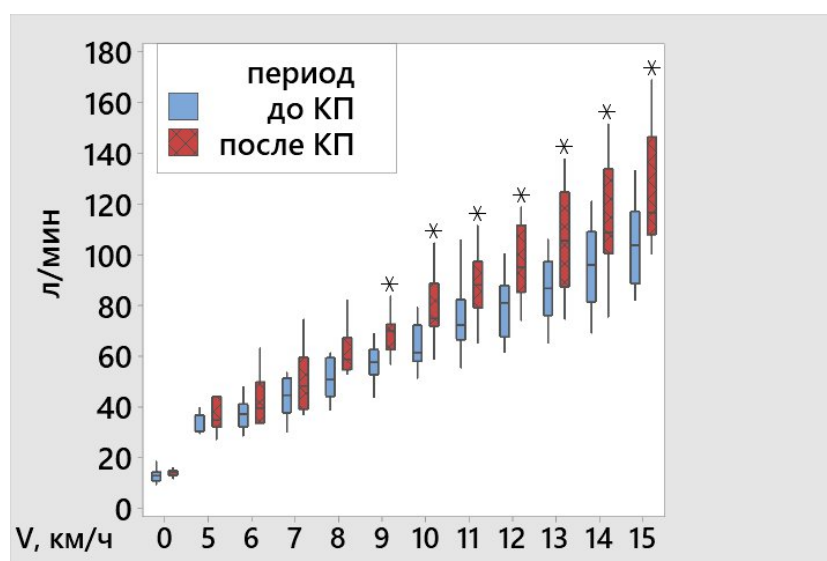


Рисунок 20 — Легочная вентиляция (л/мин) в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Концентрация лактата капиллярной крови до проведения ТИС значимо не отличалась до полета, во время полета и после полета. То же самое можно сказать о концентрации лактата капиллярной крови на пятой минуте восстановления после ТИС. Наиболее информативной, на наш взгляд, является концентрация лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после ТИС. До полета концентрация лактата на первой минуте восстановления составил $5,3 \pm 2,7$ ммоль/л, в первом полетном тестировании значимо снизилась до $3,3 \pm 1,2$ ммоль/л ($p=0,04$). В остальных полетных сессиях концентрация лактата оставалась на уровне 3,3-3,9 ммоль/л, а в тесте после полета увеличилась до $7,4 \pm 4,0$ ммоль/л ($p=0,02$) (рисунок 21).

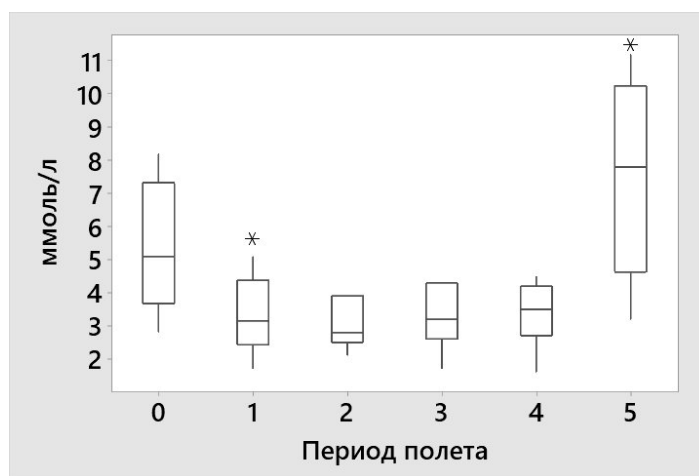


Рисунок 21 — Лактат капиллярной крови на первой минуте восстановления после ТИС (— до КП, 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки, 5 — 10±2-е сутки после КП). «*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Индивидуальный графический V-slope анализ для определения анаэробного перехода свидетельствует об относительном снижении физической работоспособности космонавтов после космического полета (таблица 2), что согласуется с полученными ранее данными о снижении потенциала

кислородтранспортной системы организма в периоде острой реадaptации к условиям Земли.

Таблица 2 — Анаэробный переход в ТИС до и после КП в обследованной группе космонавтов

№	Анаэробный переход			
	ЧСС, уд/мин		Скорость, км/ч	
	до полета	после полета	до полета	после полета
1	164	155	15	10
2	161	160	15	12
3	138	124	11	10
4	137	126	10	8
5	147	157	11	10
6	119	124	9	12

Показатель пульсовой суммы работы до полета составил 15698 ± 2269 уд., в полете значимо не изменялся и только после полета значимо увеличился до 18206 ± 2920 уд. ($p < 0,05$). Пульсовая сумма восстановления до полета составила 2438 ± 408 уд., и значимо увеличилась до 2793 ± 536 уд. только в послеполетном периоде ($p < 0,05$) (рисунок 22).

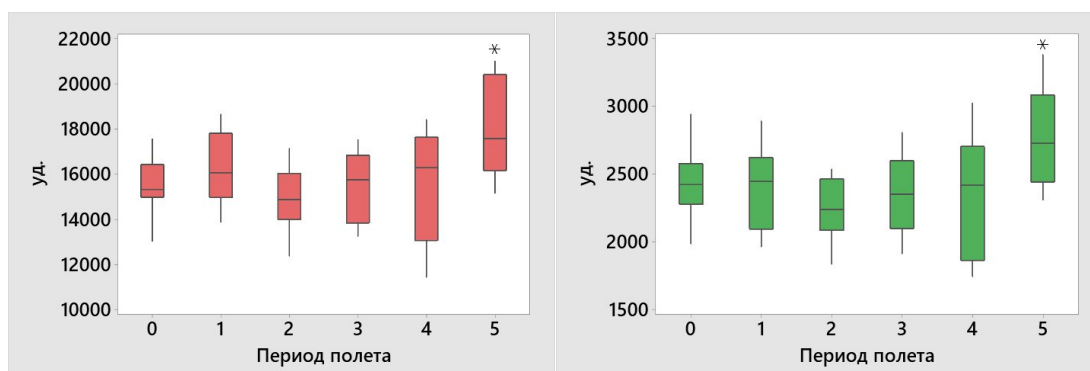


Рисунок 22 — Пульсовая сумма работы (слева) и восстановления (справа) в ТИС (0 — до КП, 1 — 42–68 суток, 2 — 83–113 суток, 3 — 115–131 суток, 4 — 140–156 суток, 5 — 10±2-е сутки после КП).

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

В целом, сравнивая полученные результаты до и после космического длительного полета, можно утверждать о снижении уровня способности к

включению функциональных резервов организма в фазе острой реадаптации к условиям гравитации.

3.1.2.1 Динамика уровня функциональных резервов космонавтов по результатам теста «Индивидуальные стратегии» в периоде реадаптации к условиям Земли

В рамках нашего исследования были проанализированы данные двух экспериментальных групп, не различающихся между собой по всем исследуемым параметрам в ТИС до полета. Группу А представляли космонавты, выполнившие ТИС на 9 сутки после КП ($n=4$), в группе Б выполнение ТИС производилось на 12 сутки после КП ($n=5$). В группе А значимое увеличение пиковой ЧСС в ТИС (от 167 ± 5 уд/мин до полета до 176 ± 5 уд/мин после полета, $p=0,03$) (рисунок 23), в то время как в группе Б значимых различий не выявлено.

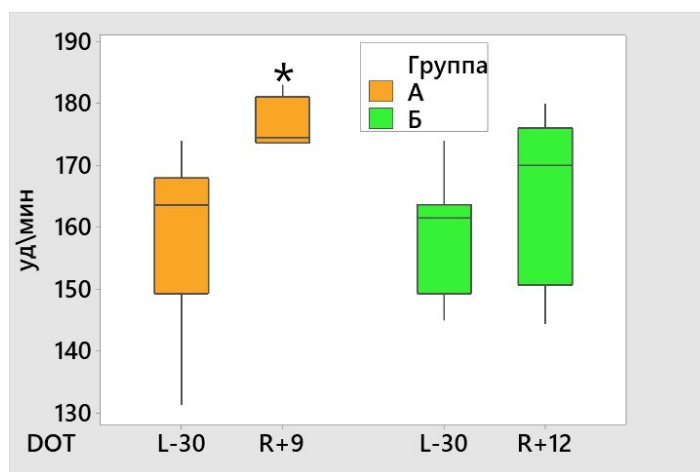


Рисунок 23 — ЧСС в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

В группе А увеличилась пульсовая сумма восстановления (2397 ± 188 уд. до полета и 2948 ± 345 уд. на 9 сутки после полета, $p=0,01$) (рисунок 24, слева), пульсовой долг (271 ± 125 уд. до полета и 533 ± 162 уд. после полета, $p=0,03$) (рисунок 24). При сравнении показателей между группами выявлено, что в группе А пульсовой долг был выше, чем в группе Б (533 ± 162 уд. на 9 сутки и $308,3 \pm 170$ ед. на 12 сутки после КП, $p=0,02$) (рисунок 24, справа). В обеих группах после КП такие показатели, как потребление O_2 , выделение CO_2 , легочная вентиляция, пульсовая сумма работы, кислородный пульс, частота дыхания, концентрация лактата капиллярной крови после ТИС не изменились по сравнению с предполетными значениями. По-видимому, отсутствие изменений показателей

ответа систем вегетативного обеспечения мышечной деятельности обусловлено успешностью процессов послеполетной реабилитации космонавтов именно к 12 суткам после КП.

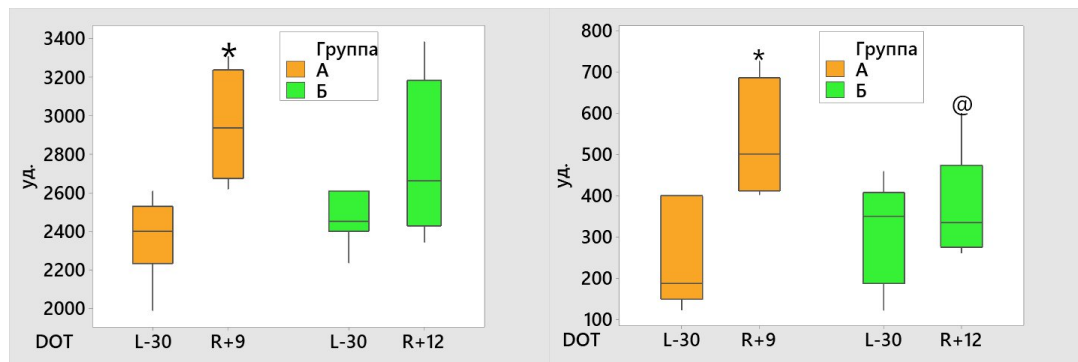


Рисунок 24 — Пульсовая сумма восстановления (слева) и пульсовой долг (справа) в ТИС до и после КП.

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

«@»- $p < 0,05$ при сравнении между группами

Космонавты были разделены на две группы по времени выполнения послеполетного обследования в ТИС (группа В из 7 космонавтов, выполнивших тест на 9–10 сутки после КП и группа Г из 7 космонавтов, выполнивших тест на 12–13 сутки после КП). Прежде всего было проведено сравнение изучаемых параметров между этими группами в периоде до полета. В ТИС значимых изменений всех исследуемых показателей до КП между группами выявлено не было.

В группе В увеличилась легочная вентиляция, до полета этот показатель составлял $100,1 \pm 17,5$ л/мин, после полета — $123,4 \pm 16$ л/мин ($p = 0,03$) (рисунок 25). Пиковая ЧСС в ТИС на 9-10 сутки полета не изменилась, однако увеличились пульсовая сумма работы (с 16349 ± 2617 уд. до полета до 18904 ± 3197 уд. после полета, $p = 0,04$) и пульсовая сумма восстановления (с 2357 ± 311 уд. до 2774 ± 498 уд. после полета, $p = 0,01$).

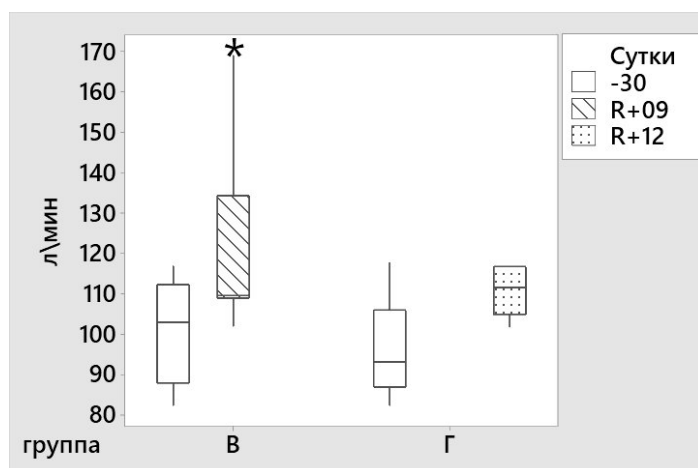


Рисунок 25 — Легочная вентиляция в ТИС в группах В и Г

«*» — $p < 0,05$ в сравнении в сравнении между значением до и после КП

Остальные показатели на 12–13 сутки после КП не отличались от дополетного уровня. Полученные результаты могут свидетельствовать в пользу повышения уровня функциональных резервов организма космонавтов на 12–13 сутки реадaptации к условиям Земли. При планировании полетов в дальний космос можно учитывать, что мобилизация функциональных резервов во время выполнения нагрузки в ТИС происходит в большей степени на 12–13 сутки после полета при условии соблюдении аналогичной схемы профилактики гипогравитационных нарушений.

3.1.2.1 Динамика функциональных резервов в годовом полете по результатам тестов МО-3 и «Индивидуальные стратегии»

В данном разделе приведены результаты обследования одного космонавта до, во время и после годового полета (355 суток). Локомоторные тренировки в годовом полете включали в себя в большей степени бег в интервальном режиме, при этом около 10% его объема было выполнено в пассивном режиме (таблица 3).

Таблица 3 — Дистанция (м) в ежедневных локомоторных тренировках в годовом и полугодовых полетах ($Me \pm IQR$)

Дистанция, м	Годовой полет (n=1)	Полугодовые полеты (n=13)
Бег активный V=5,1–9,0 км/ч	909 $\pm$ 367	781 $\pm$ 342
Бег активный V=9,1–15 км/ч	1602 $\pm$ 263	970 $\pm$ 703
Бег пассивный V=6,0–11,0 км/ч	420 $\pm$ 192	510 $\pm$ 183
Ходьба актив. V=4,0–5,5 км/ч	588 $\pm$ 241	489 $\pm$ 310
Ходьба пассив. V=4,0–5,5 км/ч	380 $\pm$ 127	305 $\pm$ 216
Дистанция за тренировку	2577 $\pm$ 361	3239 $\pm$ 1279

Сроки выполнения локомоторных тестов в ходе годовой миссии отличались от полугодовых миссий. Скорость локомоций в тесте МО-3 в первой полетной сессии также, как и в группе космонавтов, пребывавшей в полугодовых КП, оказалась снижена (рисунок 26).

Средняя частота сердечных сокращений на ступени быстрого бега снизилась на 14 сутки КП по сравнению с предполетным значением и составила **157 $\pm$ 9 уд/мин** (рисунок 26), но нужно отметить, что в сессии на 14 сутки КП снизилась и скорость бега, она составила **6,4 $\pm$ 0,8 км/ч** (рисунок 26). Снижение ЧСС во многом обусловлено скоростью и уровнем вертикальной осевой нагрузки, которая на 14 сутки составляла 57 кг (рисунок 27).

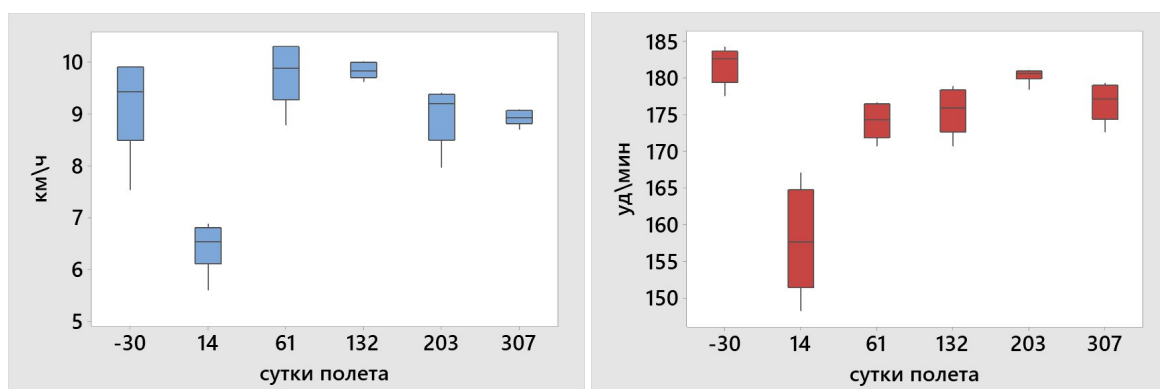


Рисунок 26 — Средняя скорость локомоций (слева) и частота сердечных сокращений (справа) космонавта на ступени быстрого бега в тесте МО-3 в годовом КП

Уровень вертикальной осевой нагрузки в первой полетной сессии был выше, чем во всех полетных сессиях и составил 79% от веса тела (рисунок 27), что значительно выше рекомендованного. В остальных полетных сессиях уровень вертикальной осевой нагрузки составлял в среднем 62% от веса тела космонавта.

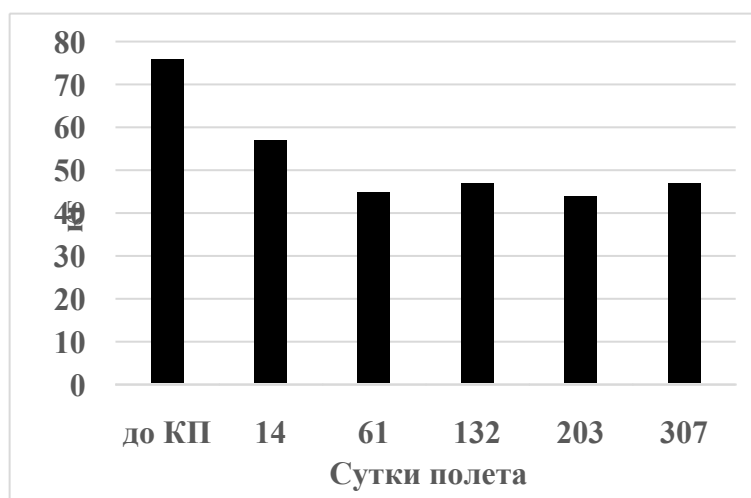


Рисунок 27 — Уровень вертикальной осевой нагрузки (кг) при выполнении теста МО-3 в годовом КП

У космонавта в годовом полете ФС в фоновом исследовании была закономерно выше, чем в ходе полета в связи с увеличением уровня вертикальной осевой нагрузки и составила $11,7 \pm 2,0$ усл.ед. В первой полетной сессии ФС во время быстрого бега составляла $15,2 \pm 1,6$ усл.ед. и к концу полета увеличилась. Так, на 307 сутки ФС составила $17,4 \pm 1,4$ усл.ед. (рисунок 28).

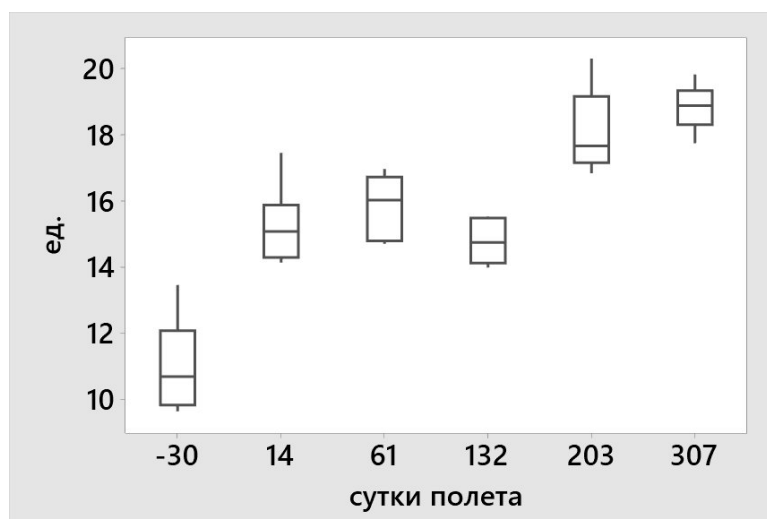


Рисунок 28 — Физиологическая стоимость нагрузки на ступени быстрого бега при выполнении теста МО-3 в годовом КП

Предложенный показатель физиологическая нагрузка на ступени быстрого бега в тесте МО-3 оказался выше до полета — $894,4 \pm 113,3$ усл. ед., по сравнению со всеми полетными сессиями. Высокие значения ФН наблюдались в первой полетной сессии — $690,5 \pm 54,0$ усл. ед., далее в ходе полета они снижались и находились в диапазоне 448,0–513,8 усл. ед. (рисунок 29).

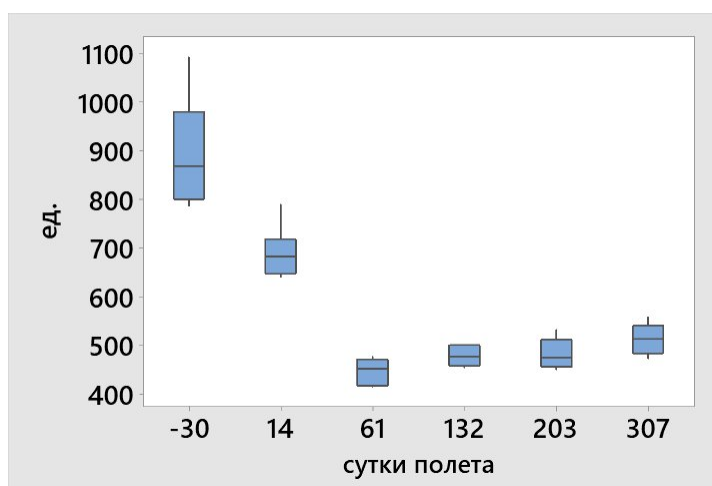


Рисунок 29 — Физиологическая нагрузка на ступени быстрого бега при выполнении теста МО-3 в годовом КП

Во всех проведенных сессиях эксперимента космонавт выполнил весь протокол ТИС, который проводился за 30 суток до КП, 5 раз во время КП и на 9 и 13 сутки после космического полета. В результате анализа полученных данных в ТИС в годовом полете, 85% от максимальной возрастной ЧСС было достигнуто

практически во всех случаях, кроме тестов на 131, 219 и 322 сутки (рисунок 30). Зарегистрировано снижение уровня пиковой ЧСС во всех полетных сессиях, это объясняется сниженной вертикальной осевой нагрузкой, улучшением физической работоспособности к концу космического полета.

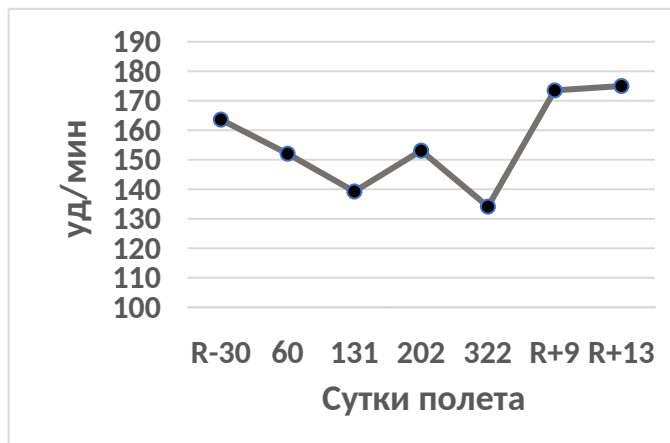


Рисунок 30 — Пиковая ЧСС в ТИС у космонавта в годовом полете

После космического полета (на 9 и 13 сутки) ЧСС увеличилась на всех ступенях нагрузки по сравнению с предполетными значениями (рисунок 31).

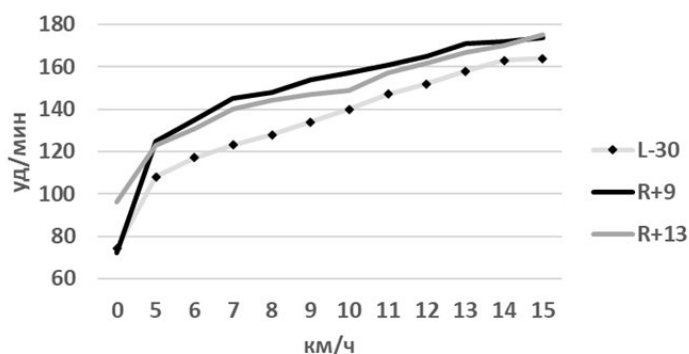


Рисунок 31 — ЧСС на каждой ступени нагрузки в ТИС у космонавта до и после годового КП

Пульсовая сумма работы и восстановления в ТИС за период годового полета демонстрирует повышение в послеполетных тестах. В ходе космического полета изменений пульсовой суммы работы и восстановления в ТИС не наблюдалось (рисунок 32).

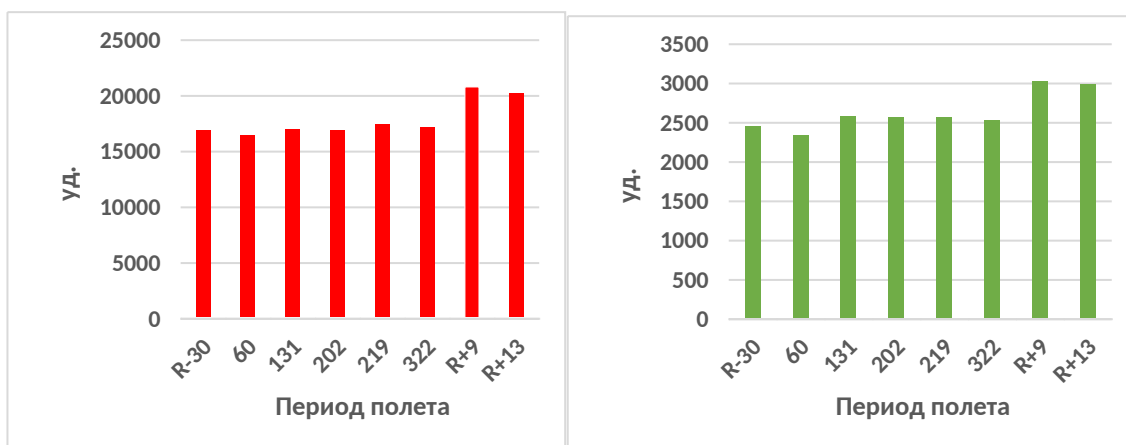


Рисунок 32 — Пульсовая сумма работы в ТИС (слева) и пульсовая сумма восстановления после ТИС (справа) у космонавта в годовом полете

Как представлено на рисунке 33, потребление O_2 и выделение CO_2 после космического полета на ступенях ходьбы и медленного бега до 10 км/ч оставались на уровне предполетных значений. На ступенях быстрого бега, со ступени 11 км/ч несколько снизилось потребление O_2 , а выделение CO_2 практически не изменилось. Легочная вентиляция в ТИС после годового полета имела тенденцию к повышению на ступенях ходьбы и медленного бега (таблица 4). Наблюдаемые явления можно рассматривать как снижение уровня функциональных резервов в ТИС, когда стандартная физическая нагрузка вызывает повышение легочной вентиляции и снижение утилизации O_2 , что указывает на снижение функции кислородтранспортной системы.

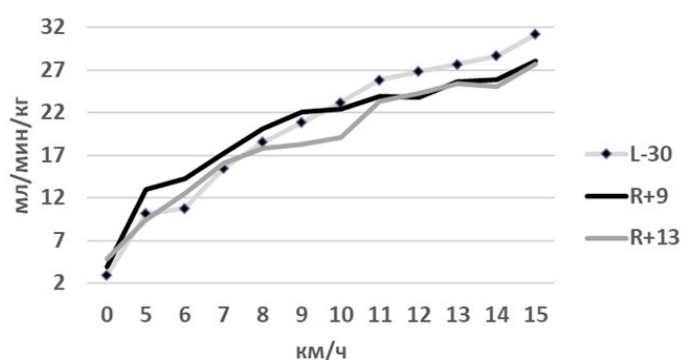


Рисунок 33 — Потребление O_2 в ТИС до и после годового КП

В полугодовых полетах легочная вентиляция после полета в ТИС значительно увеличивалась с 9–15 км/ч. Сравнивая полученные результаты в годовом полете с данными, полученными в полугодовых полетах, можно наблюдать схожие

изменения параметров газоанализа и в полугодовом полете (таблица 4). Таким образом, изменения уровня функциональных резервов после полета практически не зависят от продолжительности полета.

Таблица 4 — Сравнение физиологических показателей в ТИС в годовом и полугодовых полетах

Период	Показатели	Годовой полет (n=1)	Полугодовые полеты* (Me±IQR)
до КП	VO ₂ пик (мл/мин/кг)	31,1	32,8 ± 3,9
	ЛВ (л/мин)	88	104,8 ± 15,8
	ЧСС (уд/мин)	163	161 ± 18
	ЧД (дых/мин)	26	41 ± 6,7
	Лактат крови (ммоль/л)	4	5,1 ± 3,3
после КП	VO ₂ пик (мл/мин/кг)	27,9	28,7±5,8
	ЛВ (л/мин)	100	124,9±36,8 ↑
	ЧСС (уд/мин)	173	165±19,4
	ЧД (дых/мин)	30	46±13 ↑
	Лактат крови (ммоль/л)	4,6	7,8± 5,2 ↑

Примечание: *— приведены данные, полученные у 10 космонавтов.

↑ (p<0,05) — значимое повышение показателя по сравнению с предполетными значениями.

Концентрация лактата капиллярной крови была значительно повышена в первой полетной сессии на 60 сутки космического полета на 1 и 5 минутах восстановления после теста (11,5 ммоль/л и 10,8 ммоль/л, соответственно), что позволяет предположить, что на втором месяце все еще наблюдается острая стадия адаптации к условиям невесомости. В остальных полетных сессиях концентрация лактата капиллярной крови была ниже предполетных значений (рисунок 35). После полета концентрация лактата капиллярной крови после ТИС оказалась выше предполетных значений (рисунок 34), что соответствует

полученным ранее данным о снижении функциональных резервов организма после космического полета и отражает стадию реадaptации к условиям гравитации.

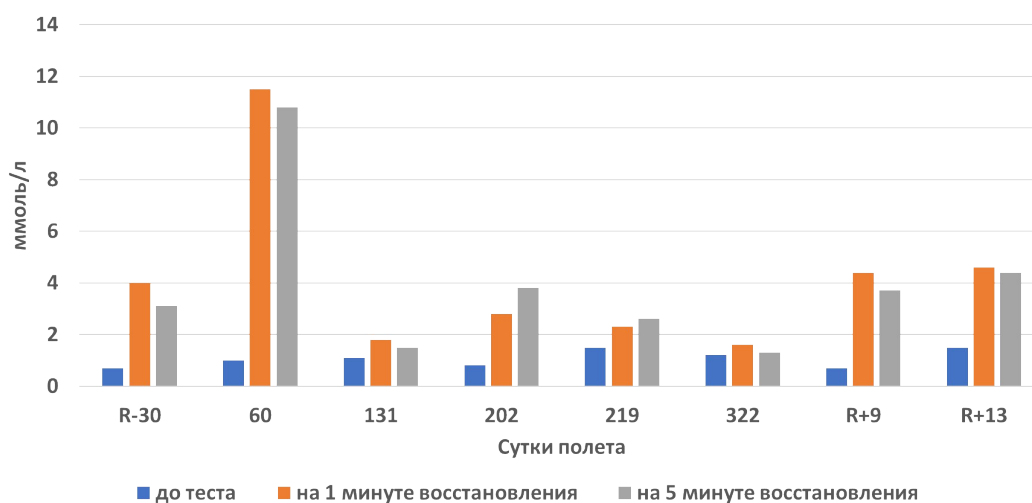


Рисунок 34 — Концентрация лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после ТИС во время годового КП

Можно отметить, что ТИС оказался информативным для диагностики уровня функциональных резервов организма космонавта в годовом полете. Были зафиксированы изменения во всех периодах КП, особенно в периоде острой адаптации в космическом полете и при возвращении в условия земной гравитации.

3.2 Линеинный и нелинейный анализы сигнала поверхностной электромиографии m.soleus как метод «цифровой биопсии»

Анализ линейных параметров сигнала пЭМГ m.soleus показал, что амплитуда пЭМГ зависела как от продолжительности полета ($p < 0,05$), так и от скорости локомоций ($p < 0,05$). Значение амплитуды пЭМГ m.soleus значительно увеличилось на 120 сутки космического полета (рисунок 35). Это может быть связано с увеличением количества рекрутируемых ДЕ для компенсации снижения выработки мышечной силы.

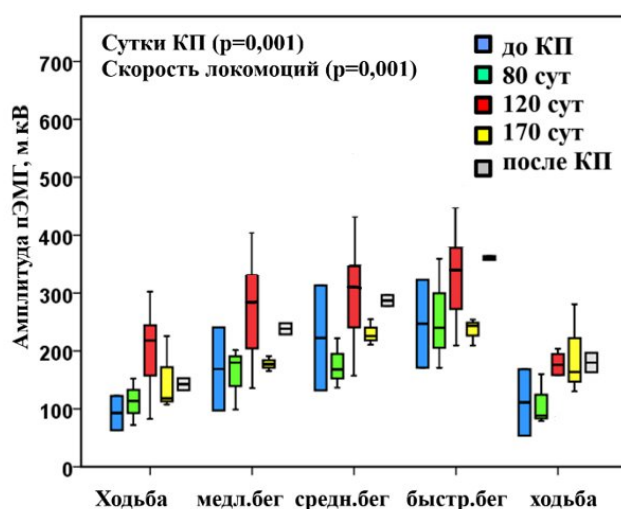


Рисунок 35 — Амплитуда пЭМГ m.soleus при выполнении теста МО-3

Фактор продолжительности КП находился в обратной взаимосвязи со значениями аппроксимированной энтропии ($r = -0,3$, $p < 0,01$). Энтропия была увеличена на 80 и 120 сутки КП (рисунок 36). Снижение энтропии с увеличением длительности КП может быть связано с увеличением доли высокоамплитудных всплесков на пЭМГ, что, в свою очередь, могло способствовать увеличению регулярности сигнала пЭМГ.

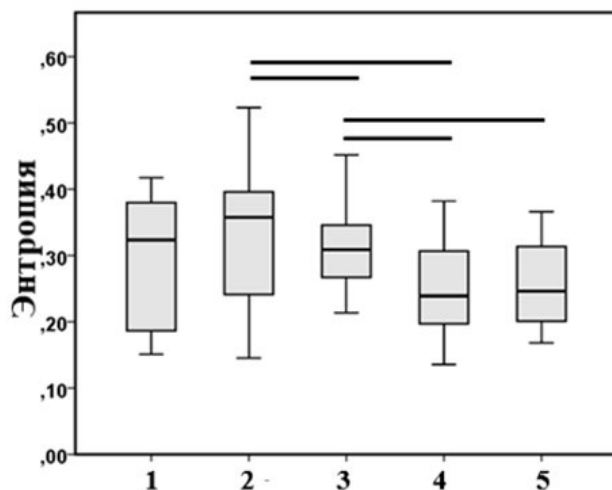


Рисунок 36 — Аппроксимированная энтропия пЭМГ m.soleus при выполнении теста МО-3. 1 — до КП, 2 — 80 сутки КП, 3 — 120 сутки КП, 4 — 170 сутки КП и 5 — после КП

Не было обнаружено существенных изменений линейных показателей и энтропии при их сравнении во время выполнения начальной и заключительной ходьбы (в начале и конце теста МО-3).

3.3. Информативность теста «Индивидуальные стратегии» для совершенствования методов оценки уровня функциональных резервов организма человека

В данном разделе приведены результаты тестирования 10 космонавтов, совершивших длительный космический полет (возраст 44 ± 6 лет, вес 84 ± 6 кг, продолжительность космических полетов 173 ± 33 суток). Космонавты были разделены на две группы, как было описано в главе «Материалы и методы» в разделе «Экспериментальные группы». Были сформированы две группы, в которых значимо различались пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления на завершающем этапе полета (140–156 сутки). В группе Д пульсовая сумма работы (17897 ± 529 уд.) оказалась выше, чем в группе Е (14678 ± 3148 уд.) ($p=0,009$). Пульсовая сумма восстановления на заключительном этапе полета в группе Д также оказалась выше, чем в группе Е (2838 ± 188 и 2181 ± 490 уд., $p=0,009$).

В результате было показано, что различий ЧСС на каждой ступени нагрузки при сравнении между группами Д и Е до полета не обнаружено. ЧСС в группе Д после полета по сравнению с предполетными данными увеличилась на ступенях от 5 до 8 км/ч, в то время как в группе Е значимых изменений до и после полета не было зарегистрировано (рисунок 37).

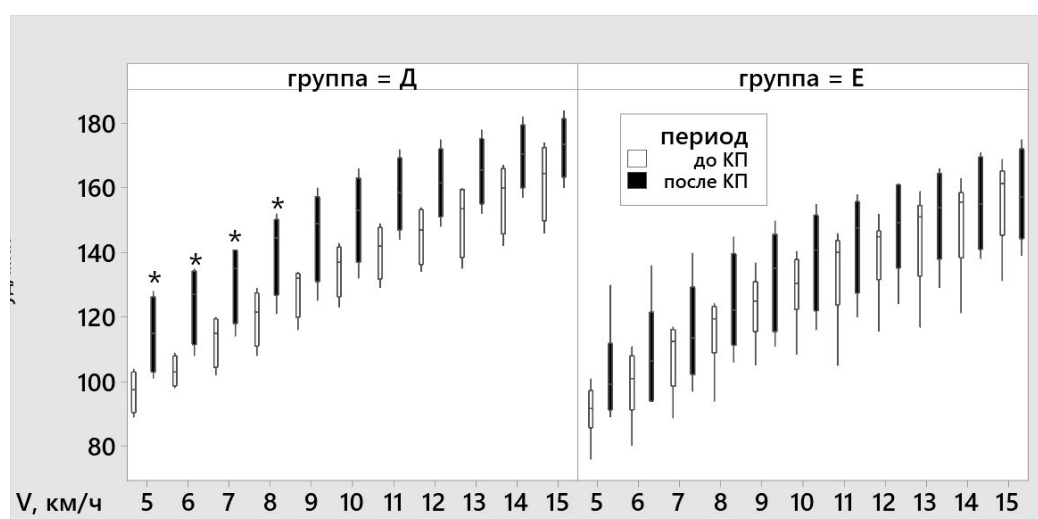


Рисунок 37 — Частота сердечных сокращений в ТИС до и после космического полета

«*» — по сравнению с предполетным уровнем значение $p < 0,05$

Анализ изменений легочной вентиляции до и после космического полета показал, что различий при сравнении на каждой ступени нагрузки между группами Д и Е до полета и после полета не обнаружено. На каждой ступени нагрузки от 8 до 15 км/ч в группе Д наблюдалось значительное повышение ЛВ по сравнению с предполетными значениями (рисунок 38). В группе Е только на ступенях нагрузки 9 и 10 км/ч были обнаружены более высокие показатели легочной вентиляции по сравнению с предполетными данными. Эти ступени нагрузки отражают перестройки в кардиореспираторной системе после перехода от ходьбы к бегу.

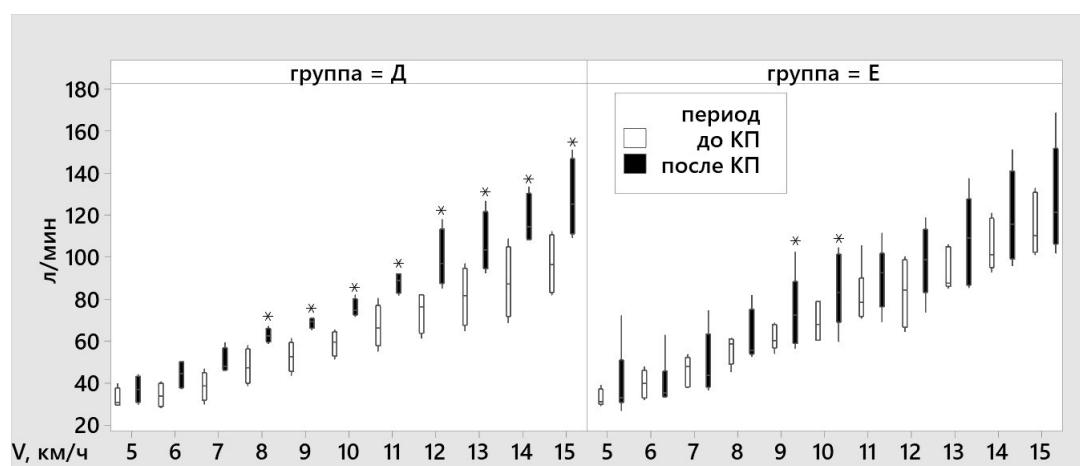


Рисунок 38 — Легочная вентиляция до и после космического полета в ТИС

«*» — $p < 0,05$ в сравнении с фоновым значением группы

В исследуемых группах не было выявлено изменений объема потребления кислорода и выделения углекислого газа до и после космического полета, и также не наблюдалось различий этих параметров между группами.

В группе Д после космического полета наблюдалось повышение концентрации лактата в капиллярной крови на первой минуте восстановления после выполнения стандартной нагрузки в ТИС на 37,4% (с $5,32 \pm 1,6$ до $8,5 \pm 3,4$ ммоль/л, $p = 0,03$). В группе Е значимых различий с предполетным значением этого показателя не обнаружено ($5,3 \pm 2,7$ до полета до $6,7 \pm 3,4$ ммоль/л после полета). Мы полагаем, что повышение уровня лактата в группе Е отражает

изменения, происходящие в системе утилизации этого метаболита в острый период реадaptации к условиям Земли (рисунок 39).

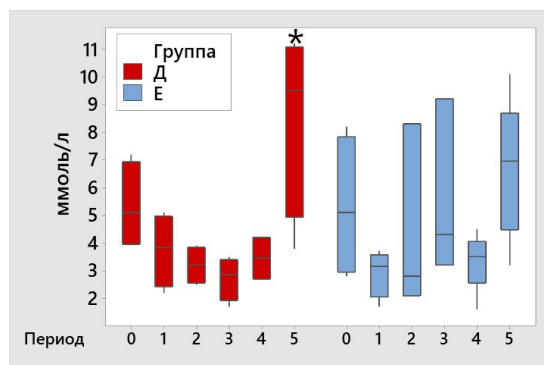


Рисунок 39 — Концентрация лактата капиллярной крови на 1 минуте восстановления после ТИС (0 — до КП, 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки, 5 — 10±2-е сутки после КП).

*- $p < 0,05$ в сравнении с предполетным значением группы

Новые показатели, предложенные для космической медицины — пульсовая сумма работы и пульсовая сумма восстановления оказались выше после завершения полета по сравнению с фоновым значением в группе Д. После полета пульсовая сумма работы в группе Д оказалась выше по сравнению с фоновым значением до выполнения космической миссии (16475 ± 1257 и 19143 ± 1972 уд., соответственно ($p = 0,02$)), в то время как в группе Е значимых различий не обнаружено (до полета 14983 ± 1572 , после полета 16148 ± 2651 уд. (рисунок 40)).

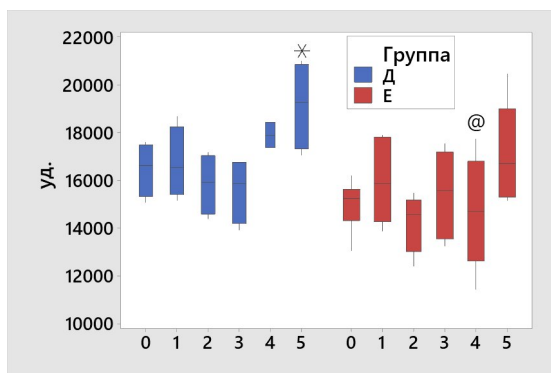


Рисунок 40 — Пульсовая сумма работы в ТИС (0 — до КП, 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки, 5 — 10±2-е сутки после КП). *- $p < 0,05$ в сравнении с фоновым значением группы; @ — $p < 0,05$ в сравнении со значением того же периода полета между группами

На завершающем этапе полета (140–156 сутки) обнаружены различия между группами по пульсовой сумме работы. В группе Д пульсовая сумма работы (17897 ± 529 уд.) оказалась на 19,4% выше, чем в группе Е (14678 ± 3148 уд.) ($p=0,009$) (рисунок 40)).

Сравнение пульсовой суммы восстановления между группами после длительного космического полета указывает на более высокие значения этого показателя в группе Д по сравнению с группой Е (рисунок 41). Пульсовая сумма восстановления на заключительном этапе полета в группе Д оказалась выше, чем в группе Е (2838 ± 188 и 2181 ± 490 уд., $p=0,009$) (рисунок 41).

После полета пульсовая сумма восстановления в группе Д составила 3027 ± 405 , что выше, чем показатель в этой группе до полета 2575 ± 326 уд. ($p=0,03$), и выше, чем в группе Е после полета 2599 ± 350 уд. ($p=0,02$) (рисунок 41).

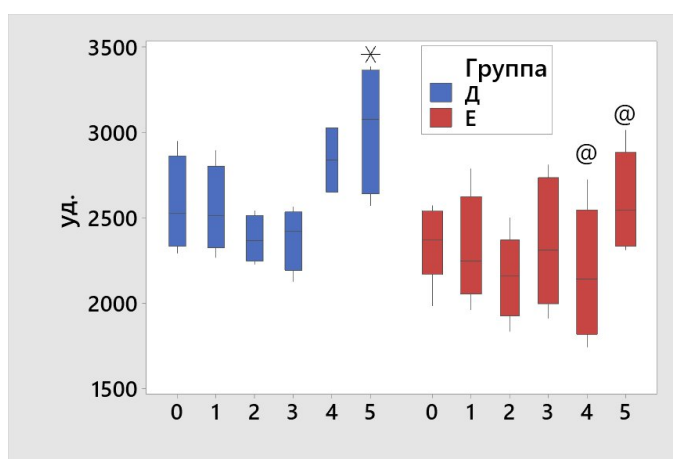


Рисунок 41 — Пульсовая сумма восстановления после теста ИС (0 — до КП, 1 — 42–68 сутки, 2 — 83–113 сутки, 3 — 115–131 сутки, 4 — 140–156 сутки, 5 — 10±2-е сутки после КП).

*- $p < 0,05$ в сравнении с фоновым значением группы;

@ — $p < 0,05$ в сравнении со значением соответствующего периода полета между группами

Анализ таких параметров, как пульсовой долг, потребление кислорода, выделение углекислого газа и максимальная частота дыхания до и после

космического полета не выявил значимых различий между группами и внутри групп.

Таким образом, группы, разделенные по пульсовым суммам на заключительном этапе полета, значимо различались по этим показателям в ранний период реадaptации после ДКП, что свидетельствует о высокой прогностической способности ТИС. Свидетельством прогностической ценности ТИС является то, что в группе с более высоким ответом сердечно-сосудистой системы на нагрузку в полете, после полета оказались повышены уровень легочной вентиляции и концентрации лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после выполнения стандартной локомоторной нагрузки. Напротив, в группе, с более низким ответом сердечно-сосудистой системы на нагрузку в полете, уровень концентрации лактата и легочная вентиляция оказались на предполетном уровне. Этот результат может иметь прикладное значение для обеспечения эффективности тренировочного процесса в ходе космических полетов.

ГЛАВА 4

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результатах работы отражены окончательные этапы разработки и определения информативности нового локомоторного теста для оценки уровня физической работоспособности человека в условиях длительных космических полетов. Сравнительный анализ нагрузочных тестов МО-3 и ТИС позволил выполнить завершающий этап разработки стандартного теста для оценки физической работоспособности космонавтов. Предварительные этапы разработки ТИС были проведены в наземных модельных экспериментах.

Параметрами, отражающими изменения физической работоспособности в тесте МО-3 в полете, являются физиологическая стоимость работы и скорость локомоций, что показано ранее в работах (Sonkin et al., 1997, Popov et al., 2004, Kozlovskaya et al., 2006, Kozlovskaya et al., 2015, Fomina et al., 2017). Реакция ЧСС на ступенчато-возрастающую физическую нагрузку в тесте МО-3 была более ярко выражена в течение первых 45 дней полета, что характеризует протекание адаптивных перестроек физиологических систем к условиям невесомости и снижение функциональных резервов организма. Влияние интенсивности физических тренировок в полете на уровень работоспособности человека после полета было описано и ранее, при этом были выявлены параметры, определяющие достаточно высокий уровень работоспособности после космического полета: интервальный режим тренировки, объем локомоций в пассивном режиме и уровень осевой нагрузки (Лысова, 2016, Фомина и др., 2018). Требуется учесть, что физиологические данные получены в тесте с локомоторной нагрузкой в пассивном режиме движения полотна бегущей дорожки (передвижение полотна усилием ног). Кроме того, группы в этом исследовании были сформированы по направленности локомоторных нагрузок в ходе космического полета (группа, выполняющая интервальные нагрузки, рекомендованные бортовой документацией, и группа, выполняющая тренировки без использования интервалов в пассивном режиме полотна дорожки)

(Козловская, et al., 2011, Шпаков и др., 2013, Kozlovskaya et al., 2015, Фомина и др., 2016).

В нашем исследовании средняя скорость локомоций в тесте МО-3 в обследуемой группе космонавтов на ступени быстрого бега на 10–14 сутки полета (первый период полета) составила $8,1 \pm 2,6$ км/ч, что по сравнению с предполетными данными ($8,8 \pm 2,5$ км/ч) оказалась значимо ниже. Однако, уже во второй полетной сессии наблюдалось значимое возрастание этого показателя до $9,1 \pm 2,7$ км/ч. В проведенных ранее работах скорости локомоций на ступени быстрого бега в тесте МО-3 в первом месяце полета составляли 7,8 км/ч, и на 2, 3 и 4 месяцах полета составляли около 8,3 км/ч (Kozlovskaya et al., 2006). Нужно отметить, что в периоде первых экспедиций на МКС, когда проводился эксперимент «Профилактика», в тесте МО-3 использовалась бегущая дорожка «TVIS», имеющая более высокое сопротивление движению полотна, возможно, этим обусловлено некоторое снижение скорости быстрого бега в тесте МО-3. В эксперименте «Профилактика-2» время на локомоторные тренировки было близко к рекомендованному бортовой документацией, и разница в объемах тренировочной локомоторной нагрузки оказалась минимальна.

Физиологическая стоимость нагрузки оказалась значимо выше в полетных сессиях, чем в тесте МО-3 до полета. В ходе полета физиологическая стоимость нагрузки по сравнению с первой полетной сессией была значимо снижена во всех полетных сессиях, так как на первом этапе полета физическая работоспособность космонавтов существенно снижается с последующим восстановлением до предполетного или близкого к нему уровня. Эта закономерность четко отражается в результатах всех тестов. Как показано ранее (Kozlovskaya et al., 2006), физиологическая стоимость нагрузки в тесте МО-3 после полета выше у космонавтов, выполнявших в ходе космического полета физическую нагрузку меньшей интенсивности. В нашем исследовании тест МО-3 после полета был выполнен только у двух космонавтов. Физиологическая стоимость нагрузки у двух космонавтов после полета оказалась на 18% выше по сравнению с предполетными значениями. Таким образом, полученные нами данные

демонстрируют снижение уровня функциональных резервов после космического полета у двух обследованных космонавтов и подтверждают ранее полученные сведения о снижении физической работоспособности после космического полета (Popov et al., 2004, Moore Jr et al., 2014, Ade et al., 2017, Lee et al., 2019). Однако вопрос о медицинских ограничениях на проведение теста МО-3 после полета все еще остается актуальной проблемой. Большая часть космонавтов в нашем исследовании не была допущена до послеполетного обследования в тесте МО-3, хотя изменения физической работоспособности именно после полета являются важным индикатором здоровья космонавта, которое требует прицельного внимания в перспективе будущих межпланетных полетов. Так, в работе (Moore Jr et al., 2010) послеполетные велоэргометрические тесты на физическую работоспособность проведены на 1 и 10 сутки после посадки, а в нашем исследовании на 10 сутки. Выполнение теста МО-3 не всегда возможно в раннем послеполетном периоде, т.к. уровень физической работоспособности космонавтов не позволяет выполнять тест в режиме пассивного перемещения полотна бегущей дорожки.

В ходе космического полета дополнительным параметром физической работы является величина вертикальной осевой нагрузки. Показано, что средний уровень вертикальной осевой нагрузки у космонавтов в период ДКП в тесте МО-3 составлял 55 ± 11 кг, что соответствует в среднем 65,7% от веса тела космонавтов в фоновых исследованиях на Земле. Согласно ранее проведенным работам в области сравнительного анализа параметров физических тренировок, величина вертикальной осевой нагрузки более 64% способствует более эффективному сохранению физической работоспособности в ходе космического полета (Фомина и др., 2018, Фомина и др., 2020). Пройденная дистанция в тесте МО-3 в среднем находилась на уровне 1059 ± 170 м, в более ранних работах на станции «Мир» дистанция в тесте МО-3 составляла около 800 м (Sonkin et al., 1997). Пройденная дистанция в тесте МО-3 у космонавтов в первых экспедициях на МКС была на уровне 963 ± 123 м, скорость локомоций на ступени быстрого бега $8,8 \pm 1,3$ км/ч (Kozlovskaya, Grigoriev, 2004). Наблюдаемые различия обусловлены, по-

видимому, либо разной сопротивляемостью полотна разных бегущих дорожек, использовавшихся на станции «Мир» и МКС, либо разницей уровня физической работоспособности космонавтов.

Физиологическая нагрузка в тесте МО-3 в группе обследованных космонавтов во всех полетных сессиях оказалась ниже, чем в условиях Земли. Также наблюдалось снижение физиологической нагрузки на завершающем этапе космического полета в сравнении с первой полетной сессией. Физиологическая нагрузка более точно, в сравнении с показателем «физиологическая стоимость», отражает динамику уровня физической работоспособности на всех этапах космического полета, и ранее не использовалась для оценки физической работоспособности в тесте МО-3.

Полученные данные позволяют провести сравнение данных космонавта, находившегося в условиях невесомости в течение 355 суток (космонавт А) и космонавта, находившегося в условиях невесомости в течение 340 суток (космонавт Б). Космонавт А выполнял тренировки на бегущей дорожке по четырехдневному микроциклу, однако, в четвертый день выбирал отдых. Космонавт Б выполнял локомоторные тренировки по четырехдневному микроциклу, и в четвертый день выполнял тренировки по личному протоколу интервальной направленности (Fomina et al., 2017). Величина вертикальной осевой нагрузки у космонавта А в среднем за полет составляла 63,6% от веса тела, что несколько ниже рекомендованного и ниже, чем у космонавта Б, у которого вертикальная осевая нагрузка составляла около 70% от веса тела, а к концу полета достигала 84,6%. Оба космонавта в годовом полете при выполнении тренировок на бегущей дорожке продемонстрировали снижение объема работы в пассивном режиме полотна дорожки — 20% от общего объема локомоторных тренировок при рекомендованном объеме 30%. При выполнении силовых тренировок на ARED, космонавт А строго соблюдал протоколы рекомендованной нагрузки в ходе полета, а космонавт Б выполнял больше повторений и нагружения в упражнениях, направленных на работу мышц нижних конечностей.

Физиологическая стоимость нагрузки в тесте МО-3 у космонавта Б в первом полетном тестировании увеличилась на 18,4% по сравнению с фоновым исследованием, в то время как в группе космонавтов, выполнивших полугодовую миссию, в первом полетном тестировании физиологическая стоимость нагрузки в тот же период увеличилась на 3,4%. Во втором полетном тестировании физиологическая стоимость снижается по сравнению с предыдущим полетным тестированием, однако, остается увеличенной относительно фона на 8%. Несколько иная динамика наблюдалась у космонавта А. В первой полетной сессии физиологическая стоимость нагрузки во время быстрого бега увеличилась на 23% относительно фонового тестирования, и к концу полета физиологическая стоимость нагрузки постепенно увеличивалась. Во время полетной сессии перед посадкой физиологическая стоимость увеличилась по сравнению с фоном на 33,8%, а по сравнению с первой полетной сессией на 12,6%. Однако стоит отметить, что у космонавта А уровень пиковой ЧСС в ТИС в ходе полета снижался по сравнению с первой полетной сессией, что свидетельствует о повышении функциональных резервов организма. Кроме этого, результаты послеполетного тестирования в ТИС на 9 сутки после годового полета показали незначимое снижение физической работоспособности в сравнении с предполетным периодом. Таким образом, рассматривая результаты, полученные нами в годовом полете, необходимо обратить внимание на расхождения результатов оценки физической работоспособности в ТИС и МО-3.

В ранее полученных данных на станции «Мир» (Козловская и др., 2001) результат воздействия условий невесомости в длительных космических миссиях практически полностью определялся интенсивностью и объемом выполнявшихся в полетах физических тренировок. Длительность полета при этом не играла критической роли. Так, при сопоставлении изменений скоростно-силовых свойств мышц и выносливости наибольшая глубина изменений была отмечена у космонавта, находившегося в невесомости 160 дней, и наименьшая, даже с некоторым превышением предполетного уровня физической работоспособности — у космонавтов с длительностью полета один год. Аналогичные данные были

получены и при проведении сравнительного анализа изменений характеристик вертикальной устойчивости, спинальных рефлекторных механизмов и других показателей.

Обобщая данные, полученные в тесте МО-3, можно сделать несколько выводов. Тест МО-3 предполагает проявление максимальных возможностей, другими словами, достижение космонавтом максимальной скорости бега в пассивном режиме движения полотна дорожки. Ответ физиологических систем организма на локомоторную нагрузку становится точкой отсчета для определения уровня физической работоспособности в дальнейшем, уже на этапе космического полета. Очевидно, что мотивация на достижение максимального результата в таком случае может оказаться не достаточной для произвольного включения всех функциональных резервов. Кроме того, медицинские ограничения на выполнение этого теста не позволяют провести оценку физической работоспособности после полета. Таким образом, реализован новый подход в оценке уровня функционального резерва космонавтов, то есть переход на использование стандартной тестовой локомоторной нагрузки в активном режиме движения полотна бегущей дорожки в условиях Земли и в космическом полете (Фомина и др., 2019). В ТИС регистрируются показатели, отражающие ответ физиологических систем на выполнение стандартной ступенчато-возрастающей физической нагрузки. Стандартность нагрузки в ТИС позволяет предложить новые для гравитационной физиологии и космической медицины критерии оценки уровня физической работоспособности космонавтов.

Согласно подходам российской системы профилактики негативных влияний невесомости, все тестовые процедуры первоначально отрабатываются в наземных модельных экспериментах. ТИС был использован в 120-суточной изоляции и в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии. Так, в 120-суточном изоляционном эксперименте для анализа уровня физической работоспособности были исследованы такие параметры, как ЧСС, концентрация лактата капиллярной крови в течение последних 30 с на скорости 3, 6 и 9 км/ч, максимальное поглощение кислорода. Целью этого исследования являлось сравнение

равномерных и интервальных локомоторных тренировок. В результате в обеих группах было обнаружено снижение лабильности ответа сердечно-сосудистой системы на нагрузку в течение эксперимента, однако этот эффект исчез после окончания изоляции. Также не было обнаружено различий между группами в отношении концентрации лактата. У испытуемых, по мнению исследователей, в период изоляции была более обширная и структурированная программа тренировок по сравнению с их повседневной жизнью, что способствовало профилактике негативных последствий гиподинамии (Abeln et al., 2022, Koschate et al., 2022).

После воздействия 21-суточной сухой иммерсии у испытуемых было зарегистрировано увеличение пульсовой стоимости работы и пульсовой суммы восстановления при выполнении ТИС на 7 сутки после иммерсии, с возвращением к фоновым значениям к 17 суткам после пребывания в условиях «сухой иммерсии» (Лысова и др., 2020). Таким образом, исследования, выполненные в орбитальных полетах, согласуются с результатами модельных экспериментов.

При апробации ТИС сначала было выполнено сопоставление ответа физиологических систем на физическую нагрузку во время космического полета и после его завершения. Выполнение этой задачи позволило оценить прогностические возможности ТИС на основе выбора показателей, значительное изменение которых в полете является предиктором снижения физической работоспособности человека после длительного космического полета.

В результате анализа полученных пред- и послеполетных данных ТИС, 85% от максимальной возрастной ЧСС (Tanaka et al., 2001) было достигнуто практически во всех случаях. В ходе полета 85% от максимальной ЧСС было зарегистрировано только в трети случаев. На основе этих данных можно считать ТИС субмаксимальным для исследуемой группы космонавтов, но только в условиях Земли. Зарегистрированное снижение уровня пиковой ЧСС во всех полетных сессиях обусловлено сниженной вертикальной осевой нагрузкой. В

ходе космического полета прирост ЧСС не продемонстрировал значимой динамики.

Информативность пиковой ЧСС в ТИС можно считать достаточно высокой, если проводить сравнения у каждого космонавта с фоновым значением или со значением по сравнению с предыдущим тестом. В нашей работе наблюдалось увеличение пульсовой суммы после полета по сравнению с фоновым значением. Однако в ходе космического полета динамика так же, как и ЧСС, не прослеживалась. Снижение пиковых значений ЧСС в полете не сопровождалось значимыми изменениями после полета.

Основываясь на задачах, сформулированных ранее, нами был рассчитан еще один информативный показатель — хронотропный резерв сердца, или Δ ЧСС. До и после космического полета практически у всех космонавтов этот показатель оказался выше 80%, что является благоприятным признаком их физического здоровья и отражает адекватную реакцию сердечно-сосудистой системы на нагрузку. Лишь в 3 случаях этот показатель был на уровне 75–77%, у космонавтов старше 47 лет. В целом это можно расценить как индивидуальную реакцию организма на физическую нагрузку или как возрастную особенность. Нужно отметить, что направленность изменений уровня хронотропного резерва сердца оказалось разной, но у части космонавтов этот показатель все же снизился после КП. В ходе космического полета во всех периодах хронотропный резерв оказался ниже фонового значения. Как известно, в условиях невесомости сердечно-сосудистая система посредством компенсаторно-адаптационных механизмов претерпевает перестройки, направленные на адаптацию к новым внешним условиям. В более ранней работе (Алферова и др., 2003) была определена зависимость изменений хронотропной и инотропной функций сердечно-сосудистой системы при выполнении нагрузочного теста от возраста космонавтов. Показано, что в каждой из возрастных групп в ходе КП исчезает возрастная разница реакции ЧСС и АД на ступенчато-возрастающую нагрузку, выявленная до полета. В большей степени изменения функционального состояния сердечно-сосудистой системы под влиянием условий невесомости проявились в

группе космонавтов 30–39 лет, в меньшей степени в возрастной группе 40–49 лет и практически отсутствовали изменения в возрастной группе космонавтов 50–55 лет. Наблюдается обратно пропорциональная зависимость хронотропной реакции на нагрузку от возраста, т.е. с возрастом прослеживается ее снижение. При этом установлено, что необходимый уровень минутного объема крови для выполняемой нагрузки обеспечивается повышением ЧСС, а не ударным объемом, который в полете наоборот снижается (Атьков, Бедненко, 1989, Турчанинова и др., 1990).

Частота дыхания на последней ступени нагрузки (15 км/ч) была значимо выше, чем до полета, однако динамики изменений этого параметра в ходе полета не наблюдалось. Темп прироста этого показателя после космического полета также не изменился по сравнению с предполетными данными. Показатель частоты дыхания в ТИС показал среднюю вариабельность среди испытуемых в ходе полета. В исследованиях, проведенных в условиях невесомости, было установлено, что эффективность газообмена снижается только в начальном периоде полета, а далее возвращается к предполетному уровню (Prisk, 2014).

Абсолютные значения потребления кислорода (мл/мин), а также уровень потребления кислорода в расчете на массу тела (мл/мин/кг) в ТИС после космического полета значимо не отличались от фоновых значений, однако имела тенденция к снижению этого показателя на ступенях быстрого бега. После космического полета значимо был увеличен показатель выделения углекислого газа на ступенях бега со скоростью 8–10 км/ч. Уровень легочной вентиляции после космического полета оказался повышенным на протяжении всех ступеней быстрого бега (на скорости бега с 9 до 15 км/ч). Повышение легочной вентиляции на 10-е сутки после длительного космического полета было описано и у астронавтов в тесте на велоэргометре (Moore Jr et al., 2014, Scott et al., 2023).

Дыхательный коэффициент в ТИС после космического полета был значимо выше на ступенях быстрого бега. В среднем дыхательный коэффициент до и после КП был выше 1,0 на ступени бега 11 км/ч. Значительное увеличение

дыхательного коэффициента на последнем отрезке быстрого бега может быть связано как с интенсификацией вентиляционной функции легких, так и с причинами метаболического характера. Этот показатель отражает переход к анаэробному механизму энергообеспечения мышечной деятельности при определении перехода. Основным методом, более точно определяющим анаэробный переход, является графический метод V-slope (Neves et al., 2022). V-slope анализ показал, что в данной группе космонавтов до космического полета анаэробный переход был в среднем на ступени бега со скоростью 12 км/ч, а после космического полета — на ступени 10 км/ч. При анализе полученных данных по показателю легочная вентиляция выявлено значительное повышение (на 10 ± 2 сутки после КП) по сравнению с фоном на ступенях нагрузки с 8 до 15 км/ч в группе с низким объемом быстрого бега. В работе (Moore et al., 2010), несмотря на некоторые различия в методике исследования (здесь выполнялась нагрузка по протоколу определения МПК на велоэргометре на 1, 10 и 30 сутки после КП), также было показано, что у астронавтов после длительного космического полета наблюдалось повышение легочной вентиляции, причем это происходило не сразу после полета, а именно на 10-е сутки, и постепенное восстановление этого показателя происходило к 30 суткам после космического полета. Ввиду медицинского ограничения на обследование космонавтов в раннем послеполетном периоде имеется возможность сравнивать данные только на 10 ± 2 сутки после космического полета.

Концентрация лактата капиллярной крови значимо изменялся в пробах, проведенных на первой минуте восстановления после стандартной нагрузки в ТИС. Увеличение концентрации лактата крови указывает на большее изменение кислотно-щелочного баланса при выполнении стандартного теста, что может приводить к нарушению работы нервных центров, снижению активности ферментных систем и, как следствие, угнетению работы мышц (Brooks, 2018, Гунина и др., 2020, Poole et al., 2021).

Учитывая полученные результаты, можно полагать, что наибольшей прогностической ценностью в ТИС обладают пульсовая сумма восстановления и

пульсовая сумма работы, повышение которых на заключительном этапе космического полета сопровождалось более низким уровнем физической работоспособности после полета. Расчет этих параметров при стандартной тестовой нагрузке имеет практическую значимость для формирования заключения о физической работоспособности космонавтов в ходе космического полета, а также это позволит корректировать программу тренировок на бегущей дорожке. Важно, что ТИС может выполняться в раннем периоде реадaptации к условиям Земли и не имеет ограничений, затрудняющих использование штатного теста МО-3.

Таким образом, если обобщить результаты исследования в ТИС, пульсовые показатели являются довольно информативными и имеют важное прикладное значение, однако для более полной и глубокой оценки физической работоспособности в ходе космического полета, кроме физиологических и пульсовых показателей, отражающих изменения в сердечно-сосудистой системе, необходимо исследование параметров газообмена.

Полученные нами данные после космического полета показали, что в группе с низким объемом быстрого бега в полете повышен уровень лактата капиллярной крови на первой минуте восстановления после выполнения стандартной локомоторной нагрузки, а в группе, выполнявшей бег с высокой скоростью, оказался на предполетном уровне, что согласуется с данными спортивной медицины и означает то, что в этой группе способности к утилизации лактата выше (Messonnier et al., 2013, Szanto et al., 2021). Тренировки с большей долей бега с высокой скоростью обеспечили увеличение емкости системы аэробного механизма энергообеспечения мышечной деятельности, и переход к анаэробным механизмам осуществлялся на более поздних этапах теста. Соответственно, в таком случае отсутствовало значительное накопления лактата, являющегося продуктом гликолитической системы обеспечения мышечной деятельности.

Результаты, свидетельствующие о повышении легочной вентиляции на ступенях нагрузки с 8 до 15 км/ч на 10 ± 2 сутки после космического полета по

сравнению с предполетным тестом, согласуются с данными о повышенном уровне лактата капиллярной крови и указывают на перенапряжение кислородтранспортной системы в группе с низким объемом быстрого бега в полете. Этот факт может иметь прикладное значение для обеспечения гибкости тренировочного процесса: в то время как для некоторых членов экипажа может быть приемлемой программа бега с более высокой интенсивностью и меньшим объемом (SPRINT), другие могут предпочесть программу с несколько меньшей интенсивностью и большим объемом (English et al., 2020). Однако существенной проблемой при оценке эффективности системы профилактики является отсутствие группы космонавтов, которые не выполняли тренировок в полете. По этой причине эффективность системы профилактики можно сравнить только с предыдущими миссиями, где применялась иная схема профилактики или со временем, предшествовавшим значительным изменениям в техническом обеспечении тренировок (Scott et al., 2019).

В этом исследовании мы выдвинули предположение о том, что линейные и нелинейные параметры пЭМГ изменяются в зависимости от воздействия условий невесомости и продолжительности КП. Наша рабочая гипотеза была направлена на то, что в условиях КП характеристики пЭМГ сместились бы к «остроконечной» модели с более низкой средней частотой и более высокой энтропией. Что касается средней амплитуды пЭМГ, то она могла измениться либо на более высокие, либо на более низкие значения. Кроме того, мы получили возможность проверить влияние скорости локомоций на изучаемые параметры пЭМГ.

Средняя амплитуда пЭМГ постепенно увеличивалась пропорционально увеличению скорости локомоций и была значительно изменена на 80–119 сутки КП. Это могло быть связано с увеличением привлечения дополнительных двигательных единиц, чтобы компенсировать снижение выработки мышечной силы (Rampichini et al., 2020), наблюдаемое после КП (Fitts et al., 2010, Lee et al., 2022). Однако недавние исследования доказывают, что нет прямой зависимости между средней амплитудой пЭМГ и мышечной силой. Кроме того, следует

учитывать, что космонавты использовали различную вертикальную осевую нагрузку, что делает среднюю амплитуду пЭМГ ненадежной для оценки мышечной модификации. С другой стороны, модельное исследование Иваненко и соавт. (Ivanenko et al., 2004) показало, что модели мышечной активности остаются стабильными даже в диапазоне 35–95% от веса тела (5–65% от G). Действительно, вертикальная осевая нагрузка изменяла скорее кинетические, чем кинематические характеристики локомоций (Ivanenko et al., 2002).

Напротив, другой линейный параметр пЭМГ, а именно медианная частота, оказался неизменным во всем изученном диапазоне скоростей локомоций, но значительно снижался пропорционально продолжительности космического полета. Существует значительное количество литературы о частоте пЭМГ в различных двигательных задачах и ее возможных корреляциях с активностью двигательных единиц. На сегодняшний день универсальных индексов для определения типа мышц по частотным индексам пЭМГ не существует. Однако имеются данные (Chan et al., 2016, Sidharth, Venugopal, 2020, Corvini, Conforto, 2022), подтверждающие, что медианная частота уменьшается с увеличением скорости бега, что отражает активацию двигательных единиц более быстрых типов. Таким образом, постепенное уменьшение медианной частоты в нашем исследовании по мере продолжительности космического полета, возможно, указывало на растущее содержание двигательных единиц быстрого типа, что представляется весьма актуальным и подтверждается гистохимическими данными космических экспериментов (Fitts et al., 2010). С другой стороны, снижение медианной частоты, вероятно, было связано с изменением структуры активности двигательных единиц. Например, сообщается, что медианная частота пЭМГ снижается во время высокоинтенсивных двигательных задач, что может быть связано со снижением скорости рекрутирования ДЕ (Marsden, 1983). Однако применимость этого явления может быть ограничена во время динамических сокращений (Garland, Gossen, 2002).

В последние годы некоторые исследования показали, что двигательные единицы, напротив, увеличивают скорость рекрутирования во время утомления

(Contessa et al., 2018). Кроме того, частота пЭМГ зависит от степени синхронизации ДЕ и скорости проводимости вдоль мышечного волокна (Farina et al., 2004), на которые влияет утомление. Например, сообщается, что синхронизация ДЕ увеличивается, тогда как скорость проводимости снижается во время утомления, что связано со снижением медианной частоты (Semmler, Nordstrom, 1998). Однако никакой разницы в значениях медианной частоты в период начальной и заключительной ходьбы в тесте МО-3 обнаружено не было, что указывает на отсутствие утомления. Мышечное утомление представляет собой сложное явление, охватывающее различные причины, механизмы и формы проявления, оно развивается в результате цепочки метаболических, структурных и энергетических изменений в мышцах из-за недостаточного поступления кислорода и питательных веществ, а также в результате изменения работоспособности нервной системы (Rampichini et al., 2020). В целом снижение значений медианной частоты во время длительного космического полета скорее может быть связано с модификацией мышечных волокон в направлении более быстрых типов, чем с мышечным утомлением.

Энтропия продемонстрировала изменение своих значений по отношению к продолжительности полета, что было наиболее значительным в начале космического полета. Увеличение энтропии на 80 сутки КП может быть связано с увеличением доли высокоамплитудных всплесков на пЭМГ (Singh et al., 2019). Эти всплески, вероятно, были вызваны рекрутированием мышечных волокон быстрого типа. Это предположение подтверждается уменьшением энтропии с увеличением скорости локомоций, так как более быстрый бег предполагает более сильную синхронизацию потенциалов ДЕ.

В исследовании пЭМГ было два серьезных ограничения. Небольшое количество доступных измерений пЭМГ ($n=17$ для 6 испытуемых с различными точками исследования) было основным ограничением. Это не позволило провести более убедительный и адекватный статистический анализ. Например, разница в точках исследования между испытуемыми препятствовала использованию статистических тестов для повторных измерений. Несколько недостающих точек

исследования до и после полета были бы особенно важны для анализа. Во-вторых, образцы пЭМГ были получены при различной скорости и режимах передвижения. Продолжительность шага и, следовательно, длина выборок пЭМГ варьировались в зависимости от временных интервалов. Значения нелинейных параметров критически не зависят от длительности записи, и даже короткие (1–2 с) записи являются информативными. В будущих исследованиях было бы крайне важно собрать больше записей пЭМГ в идентичных точках исследования. Кроме того, существует большой объем исследований пЭМГ как по линейным, так и по нелинейным параметрам пЭМГ, полученным из мышц верхних конечностей, например, двуглавой мышцы плеча, во время различных упражнений. Имея в виду тот факт, что верхние конечности участвуют в повседневной жизнедеятельности на борту МКС, а также при выполнении внекорабельной деятельности, было бы интересно получить записи пЭМГ во время более длительного (около 10 с) изометрического или изотонического сокращения мышц верхних конечностей с увеличением нагрузки для проведения дальнейших сравнений.

Усовершенствование методов оценки уровня функциональных резервов организма человека при пребывании в условиях невесомости актуально для подготовки к межпланетным полетам. За десятилетия нахождения человека в космосе с помощью новых методов выполнено множество экспериментальных исследований, позволивших повысить качество диагностических процедур. Расчетные показатели в нагрузочном тестировании отражают динамику изменений физической работоспособности в длительных и сверхдлительных космических полетах. Сравнительный анализ результатов нагрузочных проб в полете и после его завершения подтвердила высокую эффективность физических тренировок на дорожке, велоэргометре и силовом тренажере в соответствии с принципами российской системы профилактики. Через 9 суток после длительных и сверхдлительных полетов космонавты способны выполнять бег со скоростью 15 км/час, однако физиологическая нагрузка при этом оказывается выше, чем до космического полета, но через две недели значительных различий в

эргономических и физиологических показателях по сравнению с фоном не обнаружено.

В рамках исследования нами выполнена проверка информативности и предиктивной способности нового стандартного теста на бегущей дорожке, показана его перспективность для включения в систему медицинского обеспечения пилотируемых полетов в дальний космос.

Мы предложили новые для космической медицины показатели оценки и прогнозирования уровня функциональных резервов: пульсовую сумму работы и пульсовую сумму восстановления в тесте «Индивидуальные стратегии». Расчет этих параметров при стандартной тестовой нагрузке позволит корректировать программу тренировок на бегущей дорожке в длительном космическом полете. Определение пульсовой суммы работы и пульсовой суммы восстановления на заключительном этапе полета позволяют прогнозировать уровень функциональных резервов организма после завершения миссии, что является важным для планирования внекорабельной деятельности на поверхности планеты и выбора члена экипажа для выполнения ключевых задач в раннем периоде реадaptации к условиям гравитации. Кроме этого, для более полной и объективной оценки физической работоспособности в ходе космического полета, по нашему мнению, необходимо проведение эргоспирометрии, т. к. этот метод позволяет более точно зарегистрировать изменения физической работоспособности, а также является важным инструментом при составлении индивидуальной тренировочной программы в ходе длительного или сверхдлительного космического полета.

Изучение параметров теста «Индивидуальные стратегии» также позволило определить уровень физической работоспособности после космического полета и тем самым подтвердить профилактическую эффективность быстрого бега в активном режиме для профилактики неблагоприятного влияния невесомости на организм человека. Новый тест на дорожке позволил оценить уровень функциональных резервов организма на основе ответа систем вегетативного

обеспечения мышечной деятельности в ответ на стандартную локомоторную нагрузку с перемещением полотна с помощью мотора.

В заключение отметим, что такой нелинейный параметр, как энтропия может быть использован в качестве индикатора функционального состояния мотонейронного пула в ходе длительного космического полета. Суммарный эффект в виде уменьшения сложности и большей регулярности сигнала пЭМГ, вероятно, обусловлен смещением активности двигательных единиц в сторону их более быстрых типов. Однако серьезные ограничения исследования (небольшое количество записей в сочетании с разными точками исследования у разных космонавтов) позволяют рассматривать эти факты как многообещающие, но еще окончательно не установленные. Тем не менее, полученные результаты позволяют установить тот факт, что метод поверхностной электромиографии для изучения изменений в нервно-мышечной системе в ходе космического полета является весьма перспективным и неинвазивным и может рассматриваться в качестве «цифровой биопсии» мышц.

ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованы подходы к мониторингованию уровня функциональных резервов гравитационно-зависимых систем человека в соответствии с новой парадигмой подготовки к освоению дальнего космоса. Тест «Индивидуальные стратегии» и его расчетные показатели отражают динамику изменений способности к включению функциональных резервов кардиореспираторной системы в ходе космического полета и в ранний послеполетный период.
2. Пульсовая сумма восстановления и пульсовая сумма работы в стандартном локомоторном тесте на заключительном этапе полета являются прогностическими показателями состояния функциональных резервов в послеполетном периоде. Более высокие значения пульсовой суммы работы и пульсовой суммы восстановления на заключительном этапе полета сопровождаются снижением уровня физической работоспособности после полета и наоборот, низкие значения этого показателя являются предиктором высокого уровня физической работоспособности.
3. Физические тренировки согласно современным принципам российской системы профилактики неблагоприятного воздействия невесомости позволили обеспечить необходимый уровень функциональных резервов гравитационно-зависимых систем для выполнения бега со скоростью 15 км/час на 9-е и 13-е сутки после года пребывания в условиях невесомости, более высокие показатели ответа сердечно-сосудистой системы на локомоторную нагрузку ($p < 0,05$) в сравнении с предполетным периодом зарегистрированы только на 9-е сутки.
4. Электромиограмма m.soleus при выполнении бега и ходьбы изменялась в сторону уменьшения сложности и повышения регулярности сигнала при нарастании длительности пребывания человека в условиях невесомости, что соответствует представлениям о снижении функциональных резервов нервно-мышечной системы. Энтропия сигнала электромиограммы предложена в качестве перспективного параметра для неинвазивной диагностики изменений в нервно-мышечной системе для медицинского обеспечения длительных космических полетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Агаджанян, Н. А.** Функциональные резервы организма и его адаптация к различным условиям / Н. А. Агаджанян, А. Т. Быков, А. И. Труханов. – Текст : непосредственный // Современные технологии восстановительной медицины. – 2004. – С. 5-8.

2. **Айдаралиев, А. А.** Адаптация человека к экстремальным условиям: опыт прогнозирования / Айдаралиев А. А., Максимов А. Л. – Текст : непосредственный // Федеральное государственное унитарное предприятие «Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр «Наука» Обособленное подразделение «Санкт-Петербургская издательско-книготорговая фирма «Наука», 1988. – С. 126.

3. **Акулиничев, И. Т.** Некоторые результаты физиологических исследований на космических кораблях «Восток-3» и «Восток-4» / Акулиничев, И. Т., Р. М. Баевский, В. Е. Белай, П. В. Васильев, О. Г. Газенко, Л. И. Какурин, В. И. Яздовский. – Текст : непосредственный //Авиационная и космическая медицина». М. – 1963.

4. **Алферова, И.В.** Функциональное состояние сердечно-сосудистой системы космонавтов в покое в длительных космических полетах / И.В. Алферова, В.Ф. Турчанинова, З.А. Голубчикова, В.Р. Лямин. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2002. – Т. 36, № 4. – С. 20-25.

5. **Алферова, И.В.** Анализ и оценка функционального состояния сердечно-сосудистой системы космонавтов в длительных космических полетах / И.В. Алферова, В.Ф. Турчанинова, З.А. Голубчикова, В.Р. Лямин. // Физиология человека. – 2003. – Т. 29, № 6. – С. 5-11.

6. **Атьков, О.Ю.** Гипокинезия. Невесомость: Клинические и физиологические аспекты / О.Ю. Атьков, В.С. Бедненко. – Текст : непосредственный // Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, 1989.

7. **Баевский, Р. М.** Теоретические и прикладные аспекты оценки и прогнозирования функционального состояния организма при действии факторов длительного космического полета // Актовая речь на заседании ученого совета ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Москва, октябрь 2005 г. 36 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://diffpsychology.narod.ru/dderfices\1Baevski.doc>

8. **Баранов, В.М.** Дыхание и невесомость. – Текст : непосредственный // Актовая речь, М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН. – 2006.

9. **Баранова, Е. А.** Функциональная адаптация сердечно-сосудистой системы у спортсменов, тренирующихся в циклических видах спорта / Е. А. Баранова, Л. В. Капилевич. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного университета. – 2014. № 383. – С. 176-179.

10. **Бряннов, И. И.** Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе Салют-6–Союз / И. И. Бряннов, Г. И. Горгиладзе, Л. Н. Корнилова. – Текст : непосредственный // Результаты медицинских исследований, выполненных на орбитальном научно-исследовательском комплексе Салют-6–Союз / EditorМ.: Наука, 1986.

11. **Ванюшин, Ю. С.** Значение физиологических показателей для выявления функциональных резервов организма / Ю. С. Ванюшин, Н. А. Федоров, С. А. Борисевич. – Текст : непосредственный // Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта. – 2021. – Т. 16. – №. 4. – С. 131-136.

12. **Волков, Н. И.** Пульсовые критерии энергетической стоимости упражнения / Н. И. Волков, О. И. Попов, А. Г. Самборский. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 2003. – Т. 29. – №. 3. – С. 98-103.

13. **Воробьев, Е.И.** Медицинское обеспечение и основные результаты обследования экипажа космического корабля «Союз-9» / Е. И. Воробьев, А. Д. Егоров, Л. И. Какурин, Ю. Г. Нефедов. – Текст : непосредственный // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1970. № 6. – С. 26-31.

14. **Воробьев, Е.И.** Некоторые результаты медицинских исследований, выполненных во время полетов космических кораблей «Союз-6», «Союз-

7», «Союз-8» / Е. И. Воробьев, Ю. Г. Нефедов. – Текст : непосредственный // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1970. № 2. – С. 65.

15. **Гаджиева, Л.Р.** Функциональные ЭКГ тесты с использованием дозированных физических нагрузок / Л.Р. Гаджиева, С.Б. Ткаченко, М.В. Палченкова. – Текст : непосредственный // ГБОУ ДПО «Российская медицинская академия последипломного образования». – М.: ГБОУ ДПО РМАПО, 2015. – 103с. ISBN 978-5-7249-2288-3.

16. **Голубчикова, З.А.** Исследования биоэлектрической активности миокарда / И.В. Алферова, В.Ф. Турчанинова, З.А. Голубчикова, В.Р. Лямин. – Текст : непосредственный // Орбитальная станция «Мир». М. – 2001. – Т. 1. – С. 276-282.

17. **Григорьев, А. И.** Концепция здоровья и космическая медицина / А. И. Григорьев, Р. М. Баевский. – Текст : непосредственный / Слово, 2007.

18. **Курзанов, А. Н.** Клинико-физиологические аспекты диагностики функциональных резервов организма / А. Н. Курзанов, Н. В. Заболотских, А. М. Мануйлов. – Текст : непосредственный // Кубанский научный медицинский вестник. – 2015. – №. 6. – С. 73-77.

19. **Гунина, Л.М.** Контроль и управление тренировочным процессом с помощью комплекса лабораторных маркеров / Л.М. Гунина, И.Л. Рыбина, Ж.А. Санауов. – Текст : непосредственный // Science in Olympic Sports. – 2020. № 2.

20. **Какурин, Л.И.** Обоснование комплекса профилактических средств применительно к задачам полетов орбитальной станции «Салют» / Л. И. Какурин, Б. С. Катковский, В. А. Тишлер. – Текст : непосредственный // Космическая биология и авиакосмическая медицина. – 1978. № 3. – С. 20-27.

21. **Козлов, А.В.** Взаимосвязь интенсивности накопления пульсового долга со скоростью образования кислородного запроса и накопления лактата в крови при выполнении предельных циклических упражнений различной продолжительности / А. В. Козлов, А. Н. Блеер, С. П. Левушкин, В. Д. Сонькин. – Текст : непосредственный // Спортивная медицина: наука и практика. – 2023. – Т. 12, № 3. – С. 43-50.

22. **Козловская, И.Б.** Гравитация и позно-тоническая двигательная система / И.Б. Козловская. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2017. – Т. 51, № 3. – С. 5-21.

23. **Козловская, И.Б.** Векторные подходы к системе профилактики для марсианской экспедиции / И. Б. Козловская, А. Д. Егоров, В. Д. Сонькин. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 2010. – Т. 36, № 3. – С. 12-18.

24. **Козловская, И.Б.** Система профилактики в длительных космических полетах / И. Б. Козловская, И. Д. Пестов, А. Д. Егоров. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2008. – Т. 42, № 6. – С. 66-73.

25. **Козловская, И.Б.** Физические тренировки в длительных полетах / И. Б. Козловская, В. И. Степанцов, А. Д. Егоров. – Текст : непосредственный // Орбитальная станция «Мир». М. – 2001. – Т. 1. – С. 393-414.

26. **Козловская, И.Б.** Развитие российской системы профилактики неблагоприятных влияний невесомости в длительных полетах на МКС / И. Б. Козловская, Е. Н. Ярманова, А. Д. Егоров, В. И. Степанцов, Е. В. Фомина, Е. С. Томиловская. – Текст : непосредственный // Космическая биология и медицина. – 2011. – Т. 1. – С. 63-98.

27. **Кукоба, Т.Б.** Изменения скоростно-силовых качеств мышц при моделировании эффектов космического полета в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии / Т.Б. Кукоба, Д.Р. Бабич, Е.В. Фомина, О. И. Орлов. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2020. – Т. 54, № 4. – С. 23-27.

28. **Лучицкая, Е.С.** Возможности оценки параметров сердечной деятельности с использованием результатов космического эксперимента «Кардиовектор» / Е. С. Лучицкая, И. И. Фунтова, К. С. Киреев. – Текст : непосредственный // Пилотируемые полеты в космос —, 2021. – С. 324-326.

29. **Лысова, Н. Ю.** Изменение физической работоспособности испытуемых в условиях 21-суточной «сухой» иммерсии / Н. Ю. Лысова, Д. Р. Бабич, С. К.

Резванова, Е. А. Тимме, Е. В. Фомина. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2020. – Т. 54, № 4. – С. 84-87.

30. **Лысова, Н. Ю.** Эффективность физических тренировок различной направленности и весовой нагруженности в профилактике негативных эффектов невесомости в двигательной системе / Н.Ю. Лысова. – Текст : непосредственный (диссертация канд.биол.наук). // Ин-т мед.-биол. проблем, 2016.

31. **Маталыгина, О. А.** Проблемы медицинской нормы и донозологическая диагностика / О. А. Маталыгина. – Текст : непосредственный // Медицина: теория и практика. – 2020. – Т. 5. – №. 4. – С. 3-9.

32. **Парин, В.В.** Космическая кардиология / В. В. Парин, Р. М. Баевский, Ю. Н. Волков, О. Г. Газенко. – Текст : непосредственный // Космическая биология и медицина. – 1967.

33. **Поляков, В.В.** Гематологические исследования в условиях длительных космических полетов / В. В. Поляков, С. М. Иванова, В. Б. Носков, О. И. Лабеецкая, Ю. В. Ярлыкова, В. В. Караштин, Т. Г. Сарычева. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 1998. – Т. 32, № 2. – С. 9-18.

34. **Похачевский, А.Л.** Применение хронотропного индекса для анализа переносимости физической нагрузки / А. Л. Похачевский, В. М. Михайлов, А. Б. Петров, Д. А. Донсков, Д. А. Фалеев, Д. А. Похачевский, В. В. Донскова. – Текст : непосредственный // Теория и практика физической культуры. – 2017. № 7. – С. 47-49.

35. **Соколов, А. В.** Теория и практика диагностики функциональных резервов организма / А. В. Соколов, Р. Е. Калинин, А. В. Стома. – Текст : непосредственный // ООО Издательская группа "ГЭОТАР-Медиа", Москва, 2015. 176 с.

36. **Сонькин, В. Д.** Проблема оценки физической работоспособности / В. Д. Сонькин. – Текст : непосредственный // Вестник спортивной науки. – 2010. № 2. – С. 37.

37. **Степанцов, В.И.** Физическая тренировка как метод предупреждения гиподинамического синдрома / В. И. Степанцов, М. А. Тихонов, А. В. Еремин. – Текст : непосредственный // Космич. биол. и авиакосм. мед. – 1972. – Т. 6. – С. 64-69.

38. **Турчанинова, В.Ф.** Зависимость функционального состояния системы кровообращения от возраста космонавтов по результатам проб с физической нагрузкой на велоэргометре / В. Ф. Турчанинова, И. В. Алфёрова, В. В. Криволапов, В. Р. Лямин, А. П. Беляев. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2010. – Т. 44, № 5. – С. 8-13.

39. **Турчанинова, В.Ф.** Особенности центрального и регионарного кровообращения в кратковременных и длительных космических полетах / В. Ф. Турчанинова, М. В. Домрачева, И. И. Касьян. – Текст : непосредственный // Физиологические проблемы невесомости/ О.Г. Газенко, И.И. Касьян, ред. М., 1990. – С. 93.

40. **Федоров, Б.М.** Ритм сердечной деятельности и аритмии сердца в длительных космических полетах / Б. М. Федоров, З. А. Голубчикова. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 1992. – Т. 18, № 6. – С. 109.

41. **Фомина, Е.В.** Предикторы готовности космонавта к деятельности на поверхности Марса из опыта орбитальных полетов на МКС / Е. В. Фомина, Н. Ю. Лысова, С. К. Резванова, К. С. Киреев, О. В. Котов, О. В. Новицкий, Е. А. Тимме. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2019. – Т. 53, № 7. – С. 19-27.

42. **Фомина, Е.В.** Осевая нагрузка при выполнении локомоторных тренировок в условиях невесомости как фактор эффективности профилактики гипогравитационных нарушений / Е. В. Фомина, Н. Ю. Лысова, А. О. Савинкина. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 2018. – Т. 44, № 1. – С. 56-63.

43. **Фомина, Е.В.** Эффективность тренировок разной направленности для поддержания физической работоспособности в условиях сниженного уровня

двигательной активности / Е.В. Фомина, К.В. Уськов. – Текст : непосредственный // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2016. – Т. 50, № 5. – С. 47-55.

44. Фомина, Е. В. МКС-платформа для разработки системы профилактики гипогравитационных нарушений в межпланетных миссиях / Е. В. Фомина, Н. А. Сенаторова, В. В. Кириченко, И. В. Вагнер. – Текст : непосредственный // Воздушно-космическая сфера, 2020, (4 (105)), 8-17. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-105-4-10-21.

45. Шпаков, А.В. Сравнительный анализ эффективности различных режимов локомоторных тренировок в длительных космических полетах по данным биомеханических и электромиографических характеристик ходьбы / А. В. Шпаков, А. В. Воронов, Е. В. Фомина, Н. Ю. Лысова, М. В. Чернова, И. Б. Козловская. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 60-60.

46. Шульженко, Е.Б. Имитация детренированности организма методом «сухого» погружения / Е. Б. Шульженко, И. Ф. Виль-Вильямс. – Текст : непосредственный // Х чтения К.Э. Циолковского. – 1975. – С. 39-47.

47. Шульженко, Е.Б. Возможность проведения длительной водной иммерсии методом «сухого» погружения / Е. Б. Шульженко, И. Ф. Виль-Вильямс. – Текст : непосредственный // Косм. биол. и авиакосм. мед. – 1976. – Т. 10, № 9. – С. 82-84.

48. Ярманова, Е.Н. Разработка и модификация средств профилактики неблагоприятных эффектов невесомости в длительных космических полетах на международной космической станции / Е.Н. Ярманова. – Текст : непосредственный // Физиология человека. – 2021. – Т. 47, № 3. – С. 98-104.

49. Abdullah, S. M. Effects of prolonged space flight on cardiac structure and function / Hastings J. L., Shibata S., Platts S. H., Hamilton D. R., Thomas J. D., Hughes D. E., Bungo M. W., Levine B. D. – Текст : непосредственный // EditorAm Heart Assoc, 2013.

50. Abeln, V. Chronic, acute and protocol-dependent effects of exercise on psycho-physiological health during long-term isolation and confinement / Abeln V.,

Fomina E., Popova J., Braunsman L., Koschate J., Möller F., Feday S., Vassilieva G., Schneider S., Strüder H. – Текст : непосредственный // BMC neuroscience. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 41.

51. **Ade, C. J.** Decreases in maximal oxygen uptake following long-duration spaceflight: Role of convective and diffusive O₂ transport mechanisms / Ade C. J., Broxterman R. M., Moore A., Barstow T. J. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2017. – Т. 122, № 4. – С. 968-975.

52. **Arbeille, P.** Carotid and femoral arterial wall distensibility during long-duration spaceflight / Arbeille P., Provost R., Zuj K. – Текст : непосредственный // Aerospace Medicine and Human Performance. – 2017. – Т. 88, № 10. – С. 924-930.

53. **Balestra, G.** Time-frequency analysis of surface myoelectric signals during athletic movement / Balestra G., Frassinelli S., Knaflitz M., Molinari F. – Текст : непосредственный // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. – 2001. – Т. 20, № 6. – С. 106-115.

54. **Beretta-Piccoli, M.** Motor unit synchronization and firing rate correlate with the fractal dimension of the surface EMG: A validation study / Beretta-Piccoli M., Cescon C., Vistarini A., Pisegna C., Vannini B., Zampella C., Calanni L., Soldini E., Barbero M., D'Antona G. – Текст : непосредственный // Chaos, Solitons & Fractals. – 2023. – Т. 167. – С. 113021.

55. **Bernardi, M.** Force generation performance and motor unit recruitment strategy in muscles of contralateral limbs / Bernardi M., Felici F., Marchetti M., Montellanico F., Piacentini M. F., Solomonow M. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 1999. – Т. 9, № 2. – С. 121-130.

56. **Bernardi, M.** Motor unit recruitment strategy changes with skill acquisition / Bernardi M., Solomonow M., Nguyen G., Smith A., Baratta R. – Текст : непосредственный // European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1996. – Т. 74. – С. 52-59.

57. **Berry, C. A.** PRE-GEMINI medical predictions versus gemini flight results / Berry C. A. – Текст : непосредственный // Gemini summary conference. – Scientific

and Technical Information Division, Office of Technology Utilization, National Aeronautics and Space Administration, 1967. – Т. 138. – №. 01. – С. 197.

58. **Bilodeau, M.** EMG frequency content changes with increasing force and during fatigue in the quadriceps femoris muscle of men and women / Bilodeau M., Schindler-Ivens S., Williams D., Chandran R., Sharma S. – Текст : непосредственный // Journal of electromyography and kinesiology. – 2003. – Т. 13, № 1. – С. 83-92.

59. **Boccia, G.** Muscle fiber conduction velocity and fractal dimension of EMG during fatiguing contraction of young and elderly active men / Boccia G., Dardanella D., Beretta-Piccoli M., Cescon C., Coratella G., Rinaldo N., Barbero M., Lanza M., Schena F., Rainoldi A. – Текст : непосредственный // Physiological measurement. – 2015. – Т. 37, № 1. – С. 162.

60. **Bonato, P.** Time-frequency parameters of the surface myoelectric signal for assessing muscle fatigue during cyclic dynamic contractions / Bonato P., Roy S. H., Knaflitz M., De Luca C. J. – Текст : непосредственный // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2001. – Т. 48, № 7. – С. 745-753.

61. **Boon, M. Y.** The correlation dimension: A useful objective measure of the transient visual evoked potential? / Boon M. Y., Henry B. I., Suttle C. M., Dain S. J. – Текст : непосредственный // Journal of vision. – 2008. – Т. 8, № 1. – С. 6-6.

62. **Brodan, V.** Mathematical and Graphical Analysis of Two-Phase Changes of Some Parameters during Load and Recovery / Brodan V. – Текст : непосредственный // Symp. Swed. Nutr. Found., Stockholm –, 1967. – С. 175.

63. **Brooks, G. A.** The science and translation of lactate shuttle theory / Brooks G. A. – Текст : непосредственный // Cell metabolism. – 2018. – Т. 27, № 4. – С. 757-785.

64. **Buckey, Jr J. C.** Orthostatic intolerance after spaceflight / Buckey Jr J. C., Lane L. D., Levine B. D., Watenpaugh D. E., Wright S., Moore W. E., Gaffney F. A., Blomqvist C. G. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physiology. – 1996. – Т. 81, № 1. – С. 7-18.

65. **Buttar, K. K.** A review: Maximal oxygen uptake (VO₂ max) and its estimation methods / Buttar K. K., Saboo N., Kacker S. – Текст : непосредственный // Ijresh. – 2019. – Т. 6, № 6. – С. 24-32.

66. **Canu, M. H.** Electromyographic activity in the Rhesus monkey forelimb muscles during a goal directed movement and locomotion before, during and after spaceflight / Canu M. H., Kozlovskaya I. B., Falempin M. – Текст : непосредственный // Journal of Gravitational Physiology: A Journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 2003. – Т. 10, № 2. – С. 19-28.

67. **Carter, H.** Oxygen uptake kinetics in treadmill running and cycle ergometry: a comparison / Carter H., Jones A. M., Barstow T. J., Burnley M., Williams C. A., Doust J. H. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2000. – Т. 89, № 3. – С. 899-907.

68. **Casabona, A.** Is the power spectrum of electromyography signal a feasible tool to estimate muscle fiber composition in patients with COPD? / Casabona A., Valle M. S., Laudani L., Crimi C., Russo C., Malaguarnera L., Crimi N., Cioni M. – Текст : непосредственный // Journal of Clinical Medicine. – 2021. – Т. 10, № 17. – С. 3815.

69. **Chan, C. K.** Comparison of mean frequency and median frequency in evaluating muscle fiber type selection in varying gait speed across healthy young adult individuals / Chan C. K., Timothy G. F., Yeow C.-H. – Текст : непосредственный // 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) –IEEE, 2016. – С. 1725-1728.

70. **Ciampi, Q.** Prognostic value of stress echocardiography assessed by the ABCDE protocol / Ciampi Q., Zagatina A., Cortigiani L., Wierzbowska-Drabik K., Kasprzak J. D., Haberka M., Djordjevic-Dikic A., Beleslin B., Boshchenko A., Ryabova T. – Текст : непосредственный // European heart journal. – 2021. – Т. 42, № 37. – С. 3869-3878.

71. **Clancy, E. A.** Tutorial. Surface electromyogram (sEMG) amplitude estimation: Best practices / Clancy E. A., Morin E. L., Hajian G., Merletti R. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2023. – Т. 72. – С. 102807.

72. **Comfort, P.** Effects of spaceflight on musculoskeletal health: a systematic review and meta-analysis, considerations for interplanetary travel / Comfort P., McMahon J. J., Jones P. A., Cuthbert M., Kendall K., Lake J. P., Haff G. G. – Текст : непосредственный // *Sports Medicine*. – 2021. – Т. 51. – С. 2097-2114.

73. **Contessa, P.** Contribution from motor unit firing adaptations and muscle coactivation during fatigue / Contessa P., Letizi J., De Luca G., Kline J. C. – Текст : непосредственный // *Journal of neurophysiology*. – 2018. – Т. 119, № 6. – С. 2186-2193.

74. **Çalışkan, S. G.** Nonlinear surface EMG analysis to detect the neuroprotective effect of citicoline in rat sciatic nerve crush injury / Çalışkan S. G., Bilgin M. D. – Текст : непосредственный // *Med Biol Eng Comput*. – 2022. – Т. 60, № 10. – С. 2865-2875.

75. **Corvini, G.** Simulation study to assess the factors of influence on mean and median frequency of sEMG signals during muscle fatigue / Corvini G., Conforto S. A. – Текст : непосредственный // *Sensors (Basel)*. – 2022. – Т. 22, № 17.

76. **Day, S. J.** Experimental simulation of cat electromyogram: evidence for algebraic summation of motor-unit action-potential trains / Day S. J., Hulliger M. – Текст : непосредственный // *Journal of Neurophysiology*. – 2001. – Т. 86, № 5. – С. 2144-2158.

77. **De Witt, J. K.** Ground reaction forces during treadmill running in microgravity / De Witt J. K., Ploutz-Snyder L. L. – Текст : непосредственный // *Journal of biomechanics*. – 2014. – Т. 47, № 10. – С. 2339-2347.

78. **Delp, M. D.** Composition and size of type I, IIA, IID/X, and IIB fibers and citrate synthase activity of rat muscle / Delp M. D., Duan C. – Текст : непосредственный // *Journal of applied physiology*. – 1996. – Т. 80, № 1. – С. 261-270.

79. **Edgerton, V. R.** Sensorimotor adaptations to microgravity in humans / Edgerton V. R., McCall G. E., Hodgson J. A., Gotto J., Goulet C., Fleischmann K., Roy R. – Текст : непосредственный // *Journal of Experimental Biology*. – 2001. – Т. 204, № 18. – С. 3217-3224.

80. **Engelen, M.** Effects of hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics during heavy exercise / Engelen M., Porszasz J., Riley M., Wasserman K., Maehara K., Barstow T. J. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 1996. – Т. 81, № 6. – С. 2500-2508.

81. **English, K. L.** High intensity training during spaceflight: results from the NASA Sprint Study / English K. L., Downs M., Goetchius E., Buxton R., Ryder J. W., Ploutz-Snyder R., Guillems M., Scott J. M., Ploutz-Snyder L. L. – Текст : непосредственный // npj Microgravity. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 21.

82. **Enoka, R. M.** Physiological validation of the decomposition of surface EMG signals / Enoka R. M. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2019. – Т. 46. – С. 70-83.

83. **Eremeev, A. V.** Estimation of Physical Performance Level of Man in Long Space Flight Based on Regular Training Data / Eremeev A. V., Borisovsky P. A., Kovalenko Y. V., Lysova N. Y., Fomina E. V. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019) –Springer, 2020. – С. 166-175.

84. **Farina, D.** Evolution of surface electromyography: From muscle electrophysiology towards neural recording and interfacing / Farina D., Enoka R. M. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2023. – С. 102796.

85. **Farina, D.** Nonlinear surface EMG analysis to detect changes of motor unit conduction velocity and synchronization / Farina D., Fattorini L., Felici F., Filligoi G. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physiology. – 2002. – Т. 93, № 5. – С. 1753-1763.

86. **Farina, D.** The extraction of neural strategies from the surface EMG / Farina D., Merletti R., Enoka R. M. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2004. – Т. 96, № 4. – С. 1486-1495.

87. **Farina, D.** Accessing the neural drive to muscle and translation to neurorehabilitation technologies / Farina D., Negro F. – Текст : непосредственный // IEEE Reviews in biomedical engineering. – 2012. – Т. 5. – С. 3-14.

88. **Felici, F.** Linear and non-linear analysis of surface electromyograms in weightlifters / Felici F., Rosponi, A., Sbriccoli, P., Filligoi, G. C., Fattorini, L., Marchetti, M. – Текст : непосредственный // European journal of applied physiology. – 2001. – Т. 84. – С. 337-342.

89. **Fattorini, L.** Influence of high motor unit synchronization levels on non-linear and spectral variables of the surface EMG / Fattorini L., Felici F., Filligoi G., Tralallesi M., Farina D. – Текст : непосредственный // Journal of neuroscience methods. – 2005. – Т. 143, № 2. – С. 133-139.

90. **Fedorowski, A.** Orthostatic hypotension and cardiovascular risk / Fedorowski A., Ricci F., Sutton R. – Текст : непосредственный // Kardiologia Polska (Polish Heart Journal). – 2019. – Т. 77, № 11. – С. 1020-1027.

91. **Felici, F.** Linear and non-linear analysis of surface electromyograms in weightlifters / Felici F., Rosponi A., Sbriccoli P., Filligoi G., Fattorini L., Marchetti M. // European journal of applied physiology. – 2001. – Т. 84. – С. 337-342.

92. **Filligoi, G.** Detection of hidden rhythms in surface EMG signals with a non-linear time-series tool / Filligoi G., Felici F. – Текст : непосредственный // Medical engineering & physics. – 1999. – Т. 21, № 6-7. – С. 439-448.

93. **Fitts, R.** Prolonged space flight-induced alterations in the structure and function of human skeletal muscle fibres / Fitts R., Trappe S., Costill D., Gallagher P. M., Creer A. C., Colloton P., Peters J. R., Romatowski J., Bain J., Riley D. A. – Текст : непосредственный // The Journal of physiology. – 2010. – Т. 588, № 18. – С. 3567-3592.

94. **Fitts, R. H.** Physiology of a microgravity environment invited review: microgravity and skeletal muscle / Fitts R. H., Riley D. R., Widrick J. J. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2000. – Т. 89, № 2. – С. 823-839.

95. **Fomina, E. V.** One-year mission on ISS is a step towards interplanetary missions / Fomina E. V., Lysova N. Y., Kukoba T. B., Grishin A. P., Kornienko M. B. – Текст : непосредственный // Aerospace Medicine and Human Performance. – 2017. – Т. 88, № 12. – С. 1094-1099.

96. **Fomina, E. V.** Comparative Analysis of Efficacy of Countermeasure Provided by Different Modes of Locomotor Training in Space Flight / Fomina E. V., Lysova N. Y., Chernova M. V., Khustnudinova D. R., Kozlovskaya I. B. – Текст : непосредственный // *Fiziol Cheloveka*. – 2016. – Т. 42, № 5. – С. 84-91.

97. **Fritsch-Yelle, J. M.** An episode of ventricular tachycardia during long-duration spaceflight / Fritsch-Yelle J. M., Leuenberger U. A., D'Aunno D. S., Rossum A. C., Brown T. E., Wood M. L., Josephson M. E., Goldberger A. L. – Текст : непосредственный // *American Journal of Cardiology*. – 1998. – Т. 81, № 11. – С. 1391-1392.

98. **Fu, Q.** Impact of prolonged spaceflight on orthostatic tolerance during ambulation and blood pressure profiles in astronauts / Fu Q., Shibata S., Hastings J. L., Platts S. H., Hamilton D. M., Bungo M. W., Stenger M. B., Ribeiro C., Adams-Huet B., Levine B. D. – Текст : непосредственный // *Circulation*. – 2019. – Т. 140, № 9. – С. 729-738.

99. **Gallo, C.** Cardiovascular deconditioning during long-term spaceflight through multiscale modeling / Gallo C., Ridolfi L., Scarsoglio S. – Текст : непосредственный // *npj Microgravity*. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 27.

100. **Garland, S. J.** The muscular wisdom hypothesis in human muscle fatigue / Garland S. J., Gossen E. R. – Текст : непосредственный // *Exercise and sport sciences reviews*. – 2002. – Т. 30, № 1. – С. 45-49.

101. **Gitter, J. A.** Fractal analysis of the electromyographic interference pattern / Gitter J. A., Czerniecki M. J. – Текст : непосредственный // *Journal of neuroscience Methods*. – 1995. – Т. 58, № 1-2. – С. 103-108.

102. **Greenisen, M.** Human capabilities in the space environment / Greenisen M. Edgerton VR. – Текст : непосредственный // *Space physiology and medicine*. – 1994. – С. 194-210.

103. **Greenleaf, J.** Work capacity during 30 days of bed rest with isotonic and isokinetic exercise training / Greenleaf J., Bernauer E., Ertl A., Trowbridge T., Wade C. – Текст : непосредственный // *Journal of applied physiology*. – 1989. – Т. 67, № 5. – С. 1820-1826.

104. **Grigor'ev, A.** Space Medicine: Scientific Foundations, Achievements, and Challenges / Grigor'ev A., Orlov O., Baranov V. – Текст : непосредственный // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2021. – Т. 91, № 6. – С. 626-629.

105. **Hedge, E. T.** Implementation of exercise countermeasures during spaceflight and microgravity analogue studies: developing countermeasure protocols for bedrest in older adults (BROA) / Hedge E. T., Patterson C. A., Mastrandrea C. J., Sonjak V., Hajj-Boutros G., Faust A., Morais J. A., Hughson R. L. – Текст : непосредственный // Frontiers in Physiology. – 2022. – Т. 13. – С. 928313.

106. **Hoffler, G.** Apollo flight crew cardiovascular evaluations / Hoffler G., Johnson R. L. – Текст : непосредственный // Biomedical results of Apollo. – 1975. – С. 227-264.

107. **Hoffmann, U.** VO₂ and HR kinetics before and after International Space Station missions / Hoffmann U., Moore A. D., Koschate J., Drescher U. – Текст : непосредственный // Eur J Appl Physiol. – 2016. – Т. 116, № 3. – С. 503-11.

108. **Hughson, R. L.** Increased postflight carotid artery stiffness and inflight insulin resistance resulting from 6-mo spaceflight in male and female astronauts / Hughson R. L., Robertson A. D., Arbeille P., Shoemaker J. K., Rush J. W., Fraser K. S., Greaves D. K. – Текст : непосредственный // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. – 2016. – Т. 310, № 5. – С. H628-H638.

109. **Ivanenko, Y. P.** Control of foot trajectory in human locomotion: role of ground contact forces in simulated reduced gravity / Ivanenko Y. P., Grasso R., Macellari V., Lacquaniti F. – Текст : непосредственный // Journal of neurophysiology. – 2002. – Т. 87, № 6. – С. 3070-3089.

110. **Ivanenko, Y. P.** Five basic muscle activation patterns account for muscle activity during human locomotion / Ivanenko Y. P., Poppele R. E., Lacquaniti F. – Текст : непосредственный // The Journal of physiology. – 2004. – Т. 556, № 1. – С. 267-282.

111. **Jetté, M.** Metabolic equivalents (METS) in exercise testing, exercise prescription, and evaluation of functional capacity / Jetté M., Sidney K., Blümchen G. – Текст : непосредственный // Clinical cardiology. – 1990. – Т. 13, № 8. – С. 555-565.

112. **Jirak, P.** How spaceflight challenges human cardiovascular health / Jirak P., Mirna M., Rezar R., Motloch L. J., Lichtenauer M., Jordan J., Binneboessel S., Tank J., Limper U., Jung C. – Текст : непосредственный // European journal of preventive cardiology. – 2022. – Т. 29, № 10. – С. 1399-1411.

113. **Johnson, R. S.** The proceedings of the skylab life science symposium // Johnston, R. S., Dietlein, L. F. – Текст : непосредственный // NASA. US Government Printing Office. Washington DC. – 1974. volume 2 (No. JSC-09275-VOL-2).

114. **Juhl IV, O. J.** Update on the effects of microgravity on the musculoskeletal system / Juhl IV O. J., Buettmann E. G., Friedman M. A., DeNapoli R. C., Hoppock G. A., Donahue H. J. – Текст : непосредственный // npj Microgravity. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 28.

115. **Kandarpa, K.** Human health during space travel: An overview / Kandarpa K., Schneider V., Ganapathy K. – Текст : непосредственный // Neurology India. – 2019. – Т. 67, № 8. – С. 176.

116. **Karlsson, S.** Time-frequency analysis of myoelectric signals during dynamic contractions: a comparative study / Karlsson S., Yu J., Akay M. – Текст : непосредственный // IEEE transactions on Biomedical Engineering. – 2000. – Т. 47, № 2. – С. 228-238.

117. **Kawakami, Y.** Changes in muscle size and architecture following 20 days of bed rest / Kawakami Y., Muraoka Y., Kubo K., Suzuki Y., Fukunaga T. – Текст : непосредственный // Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 2000. – Т. 7, № 3. – С. 53-59.

118. **Keenan, K.** Age-associated changes in motor unit properties reduce signal cancellation in the simulated electromyogram / Keenan K., Farina D., Maluf K., Merletti R., Enoka R. – Текст : непосредственный // Soc Neurosci Abstr. – Т. 914 –, 2003.

119. **Khine, H. W.** Effects of prolonged spaceflight on atrial size, atrial electrophysiology, and risk of atrial fibrillation / Khine H. W., Steding-Ehrenborg K., Hastings J. L., Kowal J., Daniels J. D., Page R. L., Goldberger J. J., Ng J., Adams-Huet

B., Bungo M. W. – Текст : непосредственный // *Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology*. – 2018. – Т. 11, № 5. – С. e005959.

120. **Khodadadi, V.** Nonlinear analysis of biceps surface EMG signals for chaotic approaches / Khodadadi V., Rahatabad F. N., Sheikhan A., Dabanloo N. J. – Текст : непосредственный // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2023. – Т. 166. – С. 112965.

121. **Koryak, Y. U.** Electrically evoked and voluntary properties of the human triceps surae muscle: effects of long-term spaceflights / Koryak Y. U. – Текст : непосредственный // *Acta physiologica et pharmacologica Bulgarica*. – 2001. – Т. 26, № 1-2. – С. 21-27.

122. **Koschate, J.** Cardiorespiratory kinetics determined by pseudo-random binary sequences—comparisons between walking and cycling / Koschate J., Drescher U., Thieschäfer L., Heine O., Baum K., Hoffmann U. – Текст : непосредственный // *International journal of sports medicine*. – 2016. – Т. 37, № 14. – С. 1110-1116.

123. **Koschate, J.** Effects of aerobic exercise in confinement on cardiorespiratory kinetics and cognitive functions—results from the 4-month SIRIUS-19 isolation project / Koschate J., Möller F., Haeger M., Hoffmann U., Drescher U., Fomina E., Vogt T., Steinberg F. – Текст : непосредственный // *Acta Astronautica*. – 2022. – Т. 200. – С. 270-281.

124. **Kozlov, A.** Specific Intensity of Physiological Costs during Cyclic Operation of Different Power / Kozlov A., Vavaev A., Yakushkin A., Laptev A., Yurikov R., Sonkin V. – Текст : непосредственный // *Human Physiology*. – 2022. – Т. 48, № 1. – С. 13-19.

125. **Kozlov, A.** Method for the evaluation of anaerobic threshold based on heart rate dynamics during incremental exercise test and recovery / Kozlov A., Yakushkin A., Andreev R., Vavaev A., Yurikov R., Sonkin V. D. – Текст : непосредственный // *Human Physiology*. – 2019. – Т. 45. – С. 180-187.

126. **Kozlovskaya, I. B.** Efficacy of physical exercises in long-term space flights on ISS / Kozlovskaya I.D., Grigoriev A.I., Bogomolov V.V. – Текст : непосредственный // 57th International Astronautical Congress —, 2006. – С. A1. 3.02.

127. **Kozlovskaya, I. B.** Pathophysiology of motor functions in prolonged manned space flights / Kozlovskaya I., Kreidich Y. V., Oganov V., Koserenko O. T. – Текст : непосредственный // *Acta astronautica*. – 1981. – Т. 8, № 9-10. – С. 1059-1072.

128. **Kozlovskaya, I. B.** Russian system of countermeasures on board of the International Space Station (ISS): the first results / Kozlovskaya I. B., Grigoriev A. I. – Текст : непосредственный // *Acta Astronautica*. – 2004. – Т. 55, № 3-9. – С. 233-237.

129. **Kozlovskaya, I. B.** Russian countermeasure systems for adverse effects of microgravity on long-duration ISS flights / Kozlovskaya I. B., Yarmanova E.N, Yegorov A.D., Stepanov V. I., Fomina E.V., Tomilovskaya E.S. – Текст : непосредственный // *Aerospace medicine and human performance*. – 2015. – Т. 86, № 12. – С. A24-A31.

130. **Lago, P.** Effect of motor-unit firing time statistics on EMG spectra / Lago P., Jones N. – Текст : непосредственный // *Medical and Biological Engineering and computing*. – 1977. – Т. 15. – С. 648-655.

131. **Lee, J.** Physiological determinants of VO₂max and the methods to evaluate it: A critical review / Lee J., Zhang X. – Текст : непосредственный // *Science & Sports*. – 2021. – Т. 36, № 4. – С. 259-271.

132. **Lee, P. H.** Factors mediating spaceflight-induced skeletal muscle atrophy / Lee P. H., Chung M., Ren Z., Mair D. B., Kim D.-H. – Текст : непосредственный // *American Journal of Physiology-Cell Physiology*. – 2022. – Т. 322, № 3. – С. C567-C580.

133. **Lee, S. M.** Physical performance, countermeasures, and postflight reconditioning / Lee S. M., Scheuring R. A., Guilliams M. E., Kerstman E. L. – Текст : непосредственный // *Principles of clinical medicine for space flight*. – 2019. – С. 609-658.

134. **Litvinova, K.** Effects of artificial support stimulation on fiber and molecular characteristics of soleus muscle in men exposed to 7-day dry immersion / Litvinova K., Vikhlyantsev I., Kozlovskaya I., Podlubnaya Z., Shenkman B. – Текст :

непосредственный // Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 2004. – Т. 11, № 2. – С. P131-2.

135. **Luchitskaya, E. S.** Possibilities of Studying Force and Energy Characteristics of the Cardiac Muscle in Microgravity Using Ballistocardiography / Luchitskaya E. S., Funtova I. I. – Текст : непосредственный // Human Physiology. – 2023. – Т. 49. – №. 7. – С. 787-792.

136. **Macaulay, T. R.** Developing Proprioceptive Countermeasures to Mitigate Postural and Locomotor Control Deficits After Long-Duration Spaceflight / Macaulay T. R., Peters B. T., Wood S. J., Clement G. R., Oddsson L., Bloomberg J. J. – Текст : непосредственный // Front Syst Neurosci. – 2021. – Т. 15. – С. 658985.

137. **Marsden, C.** Muscular wisdom that minimizes fatigue during prolonged effort in man: peaks rates of motoneuron discharge and slowing of discharge during fatigue / Marsden C. – Текст : непосредственный // Motor control mechanisms in health and disease. – 1983. – С. 169-211.

138. **Marshall-Goebel, K.** Assessment of jugular venous blood flow stasis and thrombosis during spaceflight / Marshall-Goebel K., Laurie S. S., Alferova I. V., Arbeille P., Auñón-Chancellor S. M., Ebert D. J., Lee S. M., Macias B. R., Martin D. S., Pattarini J. M. – Текст : непосредственный // JAMA Network Open. – 2019. – Т. 2, № 11. – С. e1915011-e1915011.

139. **Meigal, A. Y.** Novel parameters of surface EMG in patients with Parkinson's disease and healthy young and old controls / Meigal A. I., Rissanen S., Tarvainen M., Karjalainen P., Iudina-Vassel I., Airaksinen O., Kankaanpää M. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2009. – Т. 19, № 3. – С. e206-e213.

140. **Merletti, R.** Surface EMG signal processing during isometric contractions / Merletti R., Conte L. R. L. – Текст : непосредственный // Journal of Electromyography and Kinesiology. – 1997. – Т. 7, № 4. – С. 241-250.

141. **Merletti, R.** Myoelectric manifestations of fatigue in voluntary and electrically elicited contractions / Merletti R., Knaflitz M., De Luca C. J. – Текст :

непосредственный // Journal of applied physiology. – 1990. – Т. 69, № 5. – С. 1810-1820.

142. **Meigal, A.Y.** Electromyographic evaluation of countermeasures during the terrestrial simulation of interplanetary spaceflight in Mars500 project / Meigal A., Fomina E. – Текст : непосредственный // Pathophysiology. – 2016. – Т. 23, № 1. – С. 11-8.

143. **Merletti R.** Tutorial. Surface EMG detection in space and time: Best practices / Merletti R., Muceli S. – Текст : непосредственный // J Electromyogr Kinesiol. – 2019. – Т. 49. – С. 102363.

144. **Messonnier, L. A.** Lactate kinetics at the lactate threshold in trained and untrained men / Messonnier L. A., Emhoff C.-A. W., Fattor J. A., Horning M. A., Carlson T. J., Brooks G. A. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physiology. – 2013. – Т. 114, № 11. – С. 1593-1602.

145. **Moore, A. D.** The first 10 years of aerobic exercise responses to long-duration ISS flights / Moore A. D., Lynn P. A., Feiveson A. H. – Текст : непосредственный // Aerospace Medicine and Human Performance. – 2015. – Т. 86, № 12. – С. A78-A86.

146. **Moore, Jr A. D.** Maximum Oxygen Uptake during Long-Duration Space Flight: Preliminary Results / Moore Jr A., Evetts S., Feiveson A., Lee S., McCleary F., Platts S., Ploutz-Snyder L. – Текст : непосредственный // 18th IAA Humans in Space Symposium: Integration and Cooperation in the Next Golden Age of Human Space Flight, 2010.

147. **Moore, Jr A. D.** Peak Oxygen Uptake during and after Long-duration Space Flight / Moore Jr A. D., Downs M. E., Lee S., Feiveson A. H., Knudsen P., Evetts S. N., Ploutz-Snyder L. – Текст : непосредственный // American College of Sports Medicine Annual Meeting, 2014.

148. **Moore, Jr A. D.** Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight / Moore Jr A. D., Downs M. E., Lee S. M., Feiveson A. H., Knudsen P., Ploutz-Snyder L. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2014. – Т. 117, № 3. – С. 231-238.

149. **Moosavi, D.** The effects of spaceflight microgravity on the musculoskeletal system of humans and animals, with an emphasis on exercise as a countermeasure: A systematic scoping review / Moosavi D., Wolovsky D., Depompeis A., David U., Lennington D., Bodden R., Garber C. E. – Текст : непосредственный // *Physiological Research*. – 2021. – Т. 70, № 2. – С. 119.

150. **Muscat, K. M.** Physiological and perceptual responses to incremental exercise testing in healthy men: effect of exercise test modality / Muscat K. M., Kotrach H. G., Wilkinson-Maitland C. A., Schaeffer M. R., Mendonca C. T., Jensen D. – Текст : непосредственный // *Applied physiology, nutrition, and metabolism*. – 2015. – Т. 40, № 11. – С. 1199-1209.

151. **Narici, M.** Changes in electrically evoked skeletal muscle contractions during 17-day spaceflight and bed rest / Narici M., Kayser B., Barattini P., Cerretelli P. – Текст : непосредственный // *International journal of sports medicine*. – 1997. – Т. 18, № S 4. – С. S290-S292.

152. **Neves, L. N. S.** Cardiorespiratory fitness level influences the ventilatory threshold identification / Neves L. N. S., Gasparini Neto V. H., Alves S. P., Leite R. D., Barbieri R. A., Carletti L. – Текст : непосредственный // *Journal of Physical Education*. – 2022. – Т. 32.

153. **Nieminen, H.** Evidence of deterministic chaos in the myoelectric signal / Nieminen H., Takala E. – Текст : непосредственный // *Electromyography and clinical neurophysiology*. – 1996. – Т. 36, № 1. – С. 49-58.

154. **Nordrehaug, J.** Respiratory gas exchange during treadmill exercise testing: reproducibility and comparison of different exercise protocols / Nordrehaug J., Danielsen R., Stangeland L., Rosland G., Vik-Mo H. – Текст : непосредственный // *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*. – 1991. – Т. 51, № 7. – С. 655-658.

155. **Norsk, P.** Adaptation of the cardiovascular system to weightlessness: surprises, paradoxes and implications for deep space missions / Norsk P. – Текст : непосредственный // *Acta Physiologica*. – 2020. – Т. 228, № 3. – С. e13434.

156. **Norsk, P.** Fluid shifts, vasodilatation and ambulatory blood pressure reduction during long duration spaceflight / Norsk P., Asmar A., Damgaard M., Christensen N. J. – Текст : непосредственный // The Journal of physiology. – 2015. – Т. 593, № 3. – С. 573-584.

157. **Ogneva, I.** Mechanical properties of human soleus fibers after 7-day “dry” immersion. Effects of plantar support stimulation and high frequency electrical stimulation / Ogneva I., Ponomareva E., Altaeva E., Fokina N., Kurushin V., Kozlovskaya I., Shenkman B. – Текст : непосредственный // Acta Astronaut. – 2011. – Т. 68. – С. 1478-1485.

158. **Paiss, O.** Autoregressive modeling of surface EMG and its spectrum with application to fatigue / Paiss O., Inbar G. F. – Текст : непосредственный // IEEE transactions on biomedical engineering. – 1987. № 10. – С. 761-770.

159. **Perhonen, M. A.** Cardiac atrophy after bed rest and spaceflight / Perhonen M. A., Franco F., Lane L. D., Buckey J. C., Blomqvist C. G., Zerwekh J. E., Peshock R. M., Weatherall P. T., Levine B. D. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2001. – Т. 91, № 2. – С. 645-653.

160. **Petersen, N.** Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS / Petersen N., Jaekel P., Rosenberger A., Weber T., Scott J., Castrucci F., Lambrecht G., Ploutz-Snyder L., Damann V., Kozlovskaya I. – Текст : непосредственный // Extreme physiology & medicine. – 2016. – Т. 5, № 1. – С. 1-13.

161. **Picano, E.** Sustainability and versatility of the ABCDE protocol for stress echocardiography / Picano E., Zagatina A., Wierzbowska-Drabik K., Borguezan Daros C., D’andrea A., Ciampi Q. – Текст : непосредственный // Journal of Clinical Medicine. – 2020. – Т. 9, № 10. – С. 3184.

162. **Plotkin, D. L.** Muscle fiber type transitions with exercise training: Shifting perspectives / Plotkin D. L., Roberts M. D., Haun C. T., Schoenfeld B. J. // Sports. – 2021. – Т. 9, № 9. – С. 127.

163. **Poole, D. C.** The anaerobic threshold: 50+ years of controversy / Poole D. C., Rossiter H. B., Brooks G. A., Gladden L. B. – Текст : непосредственный // The Journal of physiology. – 2021. – Т. 599, № 3. – С. 737-767.

164. **Popov, D.V.** Dynamics of physical performance during long-duration space flight (first results of "Countermeasure" experiment) / Popov D., Khusnutdinova D., Shenkman B., Vinogradova O., Kozlovskaya I. – Текст : непосредственный // Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 2004. – Т. 11, № 2. – С. P231-2.

165. **Prisk, G. K.** Microgravity and the respiratory system / Prisk G. K. – Текст : непосредственный // European Respiratory Journal. – 2014. – Т. 43, № 5. – С. 1459-1471.

166. **Prisk, G. K.** Pulmonary challenges of prolonged journeys to space: taking your lungs to the moon / Prisk G. K. – Текст : непосредственный // Medical Journal of Australia. – 2019. – Т. 211, № 6. – С. 271-276.

167. **Qaisar, R.** Muscle unloading: A comparison between spaceflight and ground-based models / Qaisar R., Karim A., Elmoselhi A. B. – Текст : непосредственный // Acta Physiologica. – 2020. – Т. 228, № 3. – С. e13431.

168. **Rampichini, S.** Complexity Analysis of Surface Electromyography for Assessing the Myoelectric Manifestation of Muscle Fatigue: A Review / Rampichini S., Vieira T. M., Castiglioni P., Merati G. // Entropy (Basel). – 2020. – Т. 22, № 5.

169. **Ranaldi, S.** The Influence of the sEMG Amplitude Estimation Technique on the EMG-Force Relationship / Ranaldi S., Corvini G., De Marchis C., Conforto S. – Текст : непосредственный // Sensors (Basel). – 2022. – Т. 22, № 11.

170. **Recktenwald, M. R.** Effects of spaceflight on rhesus quadrupedal locomotion after return to 1G / Recktenwald M. R., Hodgson J. A., Roy R. R., Riazanski S., McCall G. E., Kozlovskaya I., Washburn D. A., Fanton J. W., Edgerton V. R. – Текст : непосредственный // Journal of neurophysiology. – 1999. – Т. 81, № 5. – С. 2451-2463.

171. **Riley, D. A.** Decreased thin filament density and length in human atrophic soleus muscle fibers after spaceflight / Riley D. A., Bain J. L., Thompson J. L., Fitts R.

H., Widrick J. J., Trappe S. W., Trappe T. A., Costill D. L. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2000. – Т. 88, № 2. – С. 567-572.

172. **Rivas, E.** Risk of impaired performance due to reduced muscle mass, strength, endurance (Short title: muscle) and risk of reduced physical performance capabilities due to reduced aerobic capacity (Short title: aerobic). / Rivas E., Strock N., Dillon E. L., Frisco D., 2023.

173. **Robergs R. A.** The surprising history of the "HRmax= 220-age" equation / R. A. Robergs, R. Landwehr. – Текст : непосредственный // Journal of Exercise Physiology Online. – 2002. – Т. 5. – №. 2. – С. 1-10.

174. **Rosenstein, M. T.** A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets / Rosenstein M. T., Collins J. J., De Luca C. J. – Текст : непосредственный // Physica D: Nonlinear Phenomena. – 1993. – Т. 65, № 1-2. – С. 117-134.

175. **Rummel, J.** Exercise and long duration spaceflight through 84 days / Rummel J., Sawin C., Michel E., Buderer M., Thornton W. – Текст : непосредственный // Journal of the American Medical Women's Association (1972). – 1975. – Т. 30, № 4. – С. 173-187.

176. Popova O. V. Is space flight arrhythmogenic? / Popova O. V., Rusanov V. B. – Текст : непосредственный // Frontiers in Physiology. – 2023. – Т. 14. – С. 1162355.

177. **Sales, M. M.** An integrative perspective of the anaerobic threshold / Sales M. M., Sousa C. V., da Silva Aguiar S., Knechtle B., Nikolaidis P. T., Alves P. M., Simões H. G. – Текст : непосредственный // Physiology & behavior. – 2019. – Т. 205. – С. 29-32.

178. **Scott, J. M.** Effects of exercise countermeasures on multisystem function in long duration spaceflight astronauts / Scott J. M., Feiveson A. H., English K. L., Spector E. R., Sibonga J. D., Dillon E. L., Ploutz-Snyder L., Everett M. E. – Текст : непосредственный // npj Microgravity. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 11.

179. **Scott, J. M.** Leveraging spaceflight to advance cardiovascular research on Earth / Scott J. M., Stoudemire J., Dolan L., Downs M. – Текст : непосредственный // Circulation Research. – 2022. – Т. 130, № 6. – С. 942-957.

180. **Scott, J. P.** Introduction to the Frontiers research topic: optimization of exercise countermeasures for human space flight—lessons from terrestrial physiology and operational considerations / Scott J. P., Weber T., Green D. A. – Текст : непосредственный // Frontiers in physiology. – 2019. – Т. 10. – С. 173.

181. **Semmler, J.** Motor unit discharge and force tremor in skill-and strength-trained individuals / Semmler J., Nordstrom M. – Текст : непосредственный // Experimental Brain Research. – 1998. – Т. 119. – С. 27-38.

182. **Shenkman, B.S.** Time-course of human muscle fibre size reduction during head-down tilt bedrest / Shenkman B., Belozerova I., Nemirovskaya T., Cheglova I., Yudaicheva A., Kiseleva E., Mazin M. – Текст : непосредственный // Journal of Gravitational Physiology: a Journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 1998. – Т. 5, № 1. – С. P71-2.

183. **Shenkman, B.S.** Contractile characteristics and sarcomeric cytoskeletal proteins of human soleus fibers in muscle unloading: role of mechanical stimulation from the support surface / Shenkman B., Podlubnaya Z., Vikhlyantsev I., Litvinova K., Udaltsov S., Nemirovskaya T., Lemesheva Y. S., Mukhina A., Kozlovskaya I. – Текст : непосредственный // Biophysics. – 2004. – Т. 49, № 5. – С. 807-815.

184. **Shenkman, B. S.** Cellular responses of human postural muscle to dry immersion / Shenkman B. S., Kozlovskaya I. B. – Текст : непосредственный // Frontiers in Physiology. – 2019. – Т. 10. – С. 187.

185. **Sidharth, N.** Surface electromyography based analysis of muscle fiber type proportions / Sidharth N., Venugopal G. – Текст : непосредственный // 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP) –IEEE, 2020. – С. 0925-0929.

186. **Singh, M. S.** Time series analysis of surface EMG signal-linear, non linear and chaotic approaches / Singh M. S., Pasumarthy R., Talasila V. – Текст :

непосредственный // 2019 Fifth Indian Control Conference (ICC) –IEEE, 2019. – С. 442-447.

187. **Solomonow, M.** Electromyogram power spectra frequencies associated with motor unit recruitment strategies / Solomonow M., Baten C., Smit J., Baratta R., Hermens H., D'Ambrosia R., Shoji H. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physiology. – 1990. – Т. 68, № 3. – С. 1177-1185.

188. **Sonkin, V.D.** Working ability ergometric testing of Russian cosmonauts during long-term flights / Sonkin V., Kozlovskaya I., Bourchick M., Zaitseva V. – Текст : непосредственный // Journal of gravitational physiology: a journal of the International Society for Gravitational Physiology. – 1997. – Т. 4, № 2. – С. P119-20.

189. **Sperlich, P. F.** Individual versus standardized running protocols in the determination of VO₂max / Sperlich P. F., Holmberg H.-C., Reed J. L., Zinner C., Mester J., Sperlich B. – Текст : непосредственный // Journal of sports science & medicine. – 2015. – Т. 14, № 2. – С. 386.

190. **Stepanek, J.** Space medicine in the era of civilian spaceflight / Stepanek J., Blue R. S., Parazynski S. – Текст : непосредственный // New England Journal of Medicine. – 2019. – Т. 380, № 11. – С. 1053-1060.

191. **Summers, R. L.** Mechanism of spaceflight-induced changes in left ventricular mass / Summers R. L., Martin D. S., Meck J. V., Coleman T. G. – Текст : непосредственный // The American journal of cardiology. – 2005. – Т. 95, № 9. – С. 1128-1130.

192. **Sutterfield, S. L.** Prediction of Planetary Mission Task Performance for Long-Duration Spaceflight / Sutterfield S. L., Alexander A. M., Hammer S. M., Didier K. D., Caldwell J. T., Barstow T. J., Ade C. J. – Текст : непосредственный // Medicine and Science in Sports and Exercise. – 2019. – Т. 51, № 8. – С. 1662-1670.

193. **Szanto, S.** Alterations of Selected Hemorheological and Metabolic Parameters Induced by Physical Activity in Untrained Men and Sportsmen / Szanto S., Mody T., Gyurcsik Z., Babjak L. B., Somogyi V., Barath B., Varga A., Matrai A. A., Nemeth N. – Текст : непосредственный // Metabolites. – 2021. – Т. 11, № 12. – С. 870.

194. **Taddeo, T. A.** Spaceflight medical systems / Taddeo T. A., Gilmore S., Armstrong C. W. – Текст : непосредственный // Principles of clinical medicine for space flight – 2019. – С. 201-231.

195. **Tanaka, H.** Age-predicted maximal heart rate revisited / Tanaka H., Monahan K. D., Seals D. R. – Текст : непосредственный // Journal of the american college of cardiology. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 153-156.

196. **Tays, G. D.** The effects of long duration spaceflight on sensorimotor control and cognition / Tays G. D., Hupfeld K. E., McGregor H. R., Salazar A. P., De Dios Y. E., Beltran N. E., Reuter-Lorenz P. A., Kofman I. S., Wood S. J., Bloomberg J. J. – Текст : непосредственный // Frontiers in neural circuits. – 2021. – Т. 15. – С. 723504.

197. **Thornton, W. E.** Muscular deconditioning and its prevention in space flight / Thornton W. E., Rummel J. A. – Текст : непосредственный // Biomedical results from skylab. – 1977. – Т. 377. – С. 191.

198. **Trappe, S.** Exercise in space: human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station / Trappe S., Costill D., Gallagher P., Creer A., Peters J. R., Evans H., Riley D. A., Fitts R. H. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2009.

199. **Trappe, S. W.** Comparison of a space shuttle flight (STS-78) and bed rest on human muscle function / Trappe S. W., Trappe T. A., Lee G. A., Widrick J. J., Costill D. L., Fitts R. H. – Текст : непосредственный // Journal of applied physiology. – 2001. – Т. 91, № 1. – С. 57-64.

200. **Trudel, G.** Hemolysis contributes to anemia during long-duration space flight / Trudel G., Shahin N., Ramsay T., Laneuville O., Louati H. – Текст : непосредственный // Nature Medicine. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 59-62.

201. **Vernice, N. A.** Long-term spaceflight and the cardiovascular system / Vernice N. A., Meydan C., Afshinnikoo E., Mason C. E. – Текст : непосредственный // Precision Clinical Medicine. – 2020. – Т. 3, № 4. – С. 284-291.

202. **Vromans, M.** Electrical stimulation frequency and skeletal muscle characteristics: effects on force and fatigue / Vromans M., Faghri P. – Текст : непосредственный // European journal of translational myology. – 2017. – Т. 27, № 4.

203. **Young, L. R.** Handbook of bioastronautics / Young, L. R., Sutton, J. P. (Eds.). – Текст : непосредственный // Springer, 2021., С. 3-19.
204. **Wang, L.** The Astronaut Center of China 90-d Head-Down Bed Rest: Overview, Countermeasures, and Effects / Wang L., Li Z., Liu S., Zhang J., Dai X., Dai Z., Xu C., Wang Y., Zang P., Guo Z. – Текст : непосредственный // Space: Science & Technology. – 2023. – Т. 3. – С. 0023.
205. **Wasserman, K.** Principles of exercise testing and interpretation / Wasserman K., Hansen J. E., Sue D. Y., Whipp B. J., Froelicher V. F. – Текст : непосредственный // Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention. – 1987. – Т. 7, № 4. – С. 189.
206. **Webber, Jr C. L.** Influence of isometric loading on biceps EMG dynamics as assessed by linear and nonlinear tools / Webber Jr C. L., Schmidt M., Walsh J. M. – Текст : непосредственный // Journal of Applied Physiology. – 1995. – Т. 78, № 3. – С. 814-822.
207. **Widrick, J. J.** Effect of a 17 day spaceflight on contractile properties of human soleus muscle fibres / Widrick J. J., Knuth S. T., Norenberg K. M., Romatowski J., Bain J. L., Riley D. A., Karhanek M., Trappe S., Trappe T. A., Costill D. – Текст : непосредственный // Journal of Physiology. – 1999.
208. **Wolf, A.** Determining Lyapunov exponents from a time series / Wolf A., Swift J. B., Swinney H. L., Vastano J. A. – Текст : непосредственный // Physica D: nonlinear phenomena. – 1985. – Т. 16, № 3. – С. 285-317.
209. **Wu, J.** sEMG signal processing methods: A review / Wu J., Li X., Liu W., Wang Z. J. – Текст : непосредственный // Journal of Physics: Conference Series. – Т. 1237 –IOP Publishing, 2019. – С. 032008.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Фомина Е. В., Сенаторова Н. А., Кириченко В. В., Вагнер И. В. МКС-платформа для разработки системы профилактики гипогравитационных нарушений в межпланетных миссиях // Воздушно-космическая сфера, 2020, №4 (105), С. 8-17. DOI: 10.30981/2587-7992-2020-105-4-10-21.
2. Meigal A., Ivanov D., Senatorova N., Monakhova U., Fomina E. Passive-mode treadmill test effectively reveals neuromuscular modification of a lower limb muscle: sEMG-based study from experiments on ISS // Acta Astronautica, 2022, № 199, С. 471-479. DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.07.045
3. Фомина Е.В., Сенаторова Н.А., В.Д. Бахтерева, Е.Н. Ярманова, Козловская И.Б. Роль быстрого бега в предотвращении негативных влияний пребывания человека в невесомости // Медицина экстремальных ситуаций, 2023, №4, С.33-40. DOI: 10.47183/mes.2023.046
4. Фомина Е. В., Лысова Н. Ю., Савинкина А. О., Жедяев Р. Ю., Сенаторова Н. А., Кукоба, Т. Б. Роль стимуляции рецепторов опоры в локомоторных тренировках для профилактики гипогравитационных нарушений // Физиология человека, 2021, Т. 47(3), С. 88-97. DOI: 10.31857/S013116462103005X
5. Фомина Е. В., Сенаторова Н.А., Романов П.В., Бабич Д.Р. Модуляция процессов адаптации человека к условиям невесомости искусственным воспроизведением эффектов действия весовой нагрузки в космическом полете // Физиология человека, 2025, Т. 51 (3), С. 125-136.
6. Fomina E., Burakova A., Senatorova N. Dynamics of functional reserves of cosmonauts in a long space flight according to the results of the ‘Individual Strategies’ test // Acta Astronautica, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2025.08.018>
7. Фомина Е.В. , Романов П.В. , Буракова А.А. , Ганичева А.А. , Сенаторова Н.А. , Бахтерева В.Д. , Кокуева М.А. , Алферова И.В. , Шушунова Т.Г. , Савенко О.А. , Харламов М.М., Гришин А.П., Матвеев В.П., Васин А.В.,

Пекарская Н.П., Поляков А.П. , Ярманова Е.Н. , Лемешко Е.В., Губкин С.В., Тапальский Д.В., Василевская М.В. Новый опыт отработки элементов медицинского обеспечения лунных миссий в кратковременном космическом полете //Авиакосмическая и экологическая медицина. 2024. Т.58. №5. С.5-14. DOI: 10.21687/0233-528X-2024-58-5-5-14.