

Шишкин Никита Валерьевич

**ИЗМЕНЕНИЯ СЕНСОРНОГО И ЦЕНТРАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ
ПОЗЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ПРЕБЫВАНИЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ И
МОДЕЛИРУЕМОЙ МИКРОГРАВИТАЦИИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

1.5.5. – Физиология человека и животных

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата медицинских наук

МОСКВА, 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем Российской академии наук.

Научный руководитель: Томиловская Елена Сергеевна, кандидат биологических наук

Официальные оппоненты: Кубряк Олег Витальевич, доктор биологических наук, профессор кафедры робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Захарьева Наталья Николаевна, доктор медицинских наук, профессор кафедры физиологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет спорта «ГЦОЛИФК»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук

Защита диссертации состоится « ____ » 202_ г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.023.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем Российской академии наук по адресу: 123007, г. Москва, Хорошевское шоссе, д. 76а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем Российской академии наук и на сайте <http://www.imbp.ru/WebPages/win1251/ScienceN/DisserSov/Shishkin2025/Shishkin.html>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат биологических наук

С.В. Поддубко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Важными факторами, которые влияют на процесс реабилитации космонавтов после возвращения на Землю из длительного космического полёта (КП), являются изменения моторного контроля и в частности – нарушения в поддержании вертикального равновесия (Kozlovskaya et al., 1988; Wood et al., 2015).

При этом существуют естественные ограничения наблюдений у космонавтов, связанные с относительно небольшим числом полётов, что затрудняет формирование значимой выборки, и тем самым актуализирует попытки максимально возможного сбора данных у космонавтов после полёта и исследования в условиях моделирования эффектов микрогравитации у здоровых добровольцев в условиях Земли (Tomilovskaya et al., 2019).

Отдельная работа сенсорных систем, участвующих в поддержании равновесия – проприоцептивной, зрительной, вестибулярной – изучается довольно давно (Гурфинкель В.С., 1965), существуют стандартизированные системы количественной оценки функции равновесия (Мезенчук, Кубряк, 2022), однако центральные механизмы, отвечающие за эти изменения, остаются малоизученными. Известно, что вследствие коротких космических полётов меняется постуральная стратегия, что говорит о переключении постуральной системы на более простые управляющие схемы (Horak, Nashner, 1986; Speers et al., 1998). После длительных полётов подобных исследований не проводилось, однако во время длительного полёта на станции МИР был обнаружен возврат к углам в суставах при прикреплении стоп к стенке корабля, приемлемых для поддержания вертикальной стойки при наличии силы тяжести (Baroni et al., 2001). Следует отметить, что в течение полёта космонавты проводят активные тренировки, в том числе на беговой дорожке, требующие сохранения координации движений, поэтому исследование изолированного влияния факторов космического полёта на систему управления движениями невозможно (Kozlovskaya et al., 2015).

Важную роль в генезе сенсомоторных нарушений после длительного космического полёта отводят изменениям, происходящим в работе вестибулярного аппарата (Black et al., 1995; Wood et al., 2015; Наумов и др., 2020). Известны работы, в которых сравнивается воздействие на сенсомоторную систему астронавтов коротких космических полётов, совершаемых впервые и повторно. Ряд авторов полагает, что ключевой системой, отвечающей за эти изменения, является вестибулярный аппарат (Clément et al., 2005). В то же время сравнения изменений постуральной устойчивости после длительных космических полётов (6 месяцев и более), совершаемых впервые и повторно, не проводилось, однако

было зарегистрировано более быстрое восстановление вестибулярной функции после повторных длительных КП (Наумов и др., 2020).

Учитывая сложность стандартизации исследований на космонавтах, целесообразно использовать наземные модели КП для проверки важности отдельных факторов космического полета, таких как, например, фактор безопорности (Kozlovskaya et al., 2007; Tomilovskaya et al., 2019).

Ранее было показано, что ведущая сенсорная модальность может играть важную роль в постуральной устойчивости (Lacour et al., 1997) и особенно – в устойчивости к внешним возмущениям (Nashner, 1976). Подобных сравнений ранее не проводилось ни после коротких или длинных КП, ни после моделирования их воздействия.

Учитывая всё вышесказанное, представлялось целесообразным изучить влияние длительных КП на вертикальную устойчивость космонавтов, разделённых на группы по рассмотренным выше факторам, доказавшим значимость своего воздействия на постуральную систему в коротких полётах и в клинической практике, а также сравнить воздействие короткой и длительной опорной разгрузки на постуральную систему.

Научная новизна

Впервые показано, что длительный космический полёт приводит к смене двигательной стратегии при поддержании равновесия при искажённой соматосенсорной или вестибулярной афферентации, при этом эти изменения сохраняются до 3-х суток после приземления. Показано, что у космонавтов, осуществляющих повторные космические полёты, восстановление постуральных реакций после приземления, требующих активного вовлечения вестибулярного аппарата, происходит быстрее, чем у совершающих первый полёт.

В модельных экспериментах («сухая» иммерсия) показано, что у людей, постуральная система которых преимущественно ориентируется на соматосенсорный вход, после длительного воздействия безопорности более выражено снижается устойчивость в тестах на равновесие с искажённой соматосенсорной афферентацией. Также показано, что короткая 5-суточная опорная разгрузка во время «сухой» иммерсии сопровождается существенно более значимым изменением интеграции вестибулярной афферентации в постуральную устойчивость, в то время как длительная 21-суточная опорная разгрузка сопровождается изменением интеграции соматосенсорной афферентации.

Теоретическая и практическая значимость

Проведённые исследования дополняют картину продолжительного воздействия микрогравитации на постуральную устойчивость. Комплексный анализ характеристик вертикальной стойки, проведенный на репрезентативной выборке участников длительных

космических полётов – 32 человека, помогает подойти к пониманию механизмов развития нарушений вертикальной стойки после длительного КП.

В работе описано функционирование системы поддержания вертикального баланса при изменениях сенсорного окружения, а также динамика изменения постуральной функции в период восстановления после микрогравитационного воздействия и его моделей.

Показано, что после длительных космических полётов изменения центральной обработки информации о положении в пространстве, выражающиеся в изменении постуральной стратегии, сохраняются в течение нескольких суток после приземления.

Дополнены знания о функционировании вестибулярного и проприоцептивного звена постуральной системы как после длительных КП, так и после воздействия опорной разгрузки различной продолжительности.

Показано, что короткое воздействие безопорности в модельных экспериментах достаточно для воспроизведения изменений, происходящих с интеграцией вестибулярного аппарата в постуральную систему, в то время как для воспроизведения изменений, связанных с интеграцией проприоцептивной системы, требуется более длительное воздействие.

Показано, что люди с преимущественной ориентацией постуральной системы на зрительную информацию обладают лучшей вертикальной устойчивостью как до, так и после космического полёта, а в случае модельных экспериментов («сухой» иммерсии) - большей устойчивостью к воздействию безопорности.

Конкретные рекомендации по использованию результатов диссертации:

1. Короткое 5-суточное воздействие опорной разгрузки рекомендуется применять для моделирования периода воздействия факторов невесомости, связанных с изменениями работы вестибулярной системы. Длительное, 21-суточное воздействие рекомендуется применять для моделирования воздействия факторов КП, связанного с работой проприоцептивной системы.
2. С учетом дефицита времени при послеполётном обследовании космонавта рекомендуется использовать самый чувствительный тест, при выполнении которого наиболее сильно проявляются постуральные изменения, связанные в том числе с изменениями координации поддержания равновесия – тест с неустойчивой опорной поверхностью, закрытыми глазами и ритмичными колебаниями головы.
3. При необходимости ранжирования космонавтов-участников длительных КП по скорости восстановления функции поддержания равновесия после приземления предпочтение желательно отдавать участникам, совершающих повторные КП.

4. Ведущая визуальная модальность, на которую в большей мере опирается постуральная система, определяемая с помощью коэффициента Ромберга – визуальная или невизуальная – может служить предиктором большей или меньшей постуральной устойчивости после длительного КП.

Цели и задачи исследования

Цель работы: исследовать особенности интеграции вестибулярной и соматосенсорной информации и изменения в центральной обработке этой информации в контроле вертикальной позы у человека после пребывания в условиях космического полета и наземного моделирования его факторов

Задачи:

1. Изучить динамику восстановления способности поддерживать вертикальное равновесие по данным стабилотрии после длительных космических полётов в условиях изменённой зрительной, соматосенсорной и вестибулярной афферентации.
2. Сравнить динамику восстановления вертикальной устойчивости после длительных космических полётов, совершаемых впервые и повторно.
3. Проанализировать влияние космического полёта на координационную структуру поддержания вертикального равновесия.
4. Изучить влияние факторов безопорности различной длительности на характеристики постуральной устойчивости в условиях измененной соматосенсорной и вестибулярной афферентации.
5. Сравнить вертикальную устойчивость у испытуемых с разной ведущей сенсорной модальностью (визуальной/невизуальной) постуральной системы после воздействия безопорности.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Динамика восстановления постуральной устойчивости после длительных космических полётов зависит от преимущественного вовлечения одной из сенсорных систем – вестибулярной или проприоцептивной.
2. Опыт предыдущих\повторных длительных космических полетов влияет на динамику восстановления постуральной устойчивости в условиях искажения сенсорной информации в период реадaptации к земным условиям.
3. Стратегия поддержания равновесия после длительных космических полетов изменяется.
4. После пребывания в условиях опорной разгрузки в зависимости от ее длительности проявляются нарушения вертикальной стойки, связанные с вовлечением различных

сенсорных систем. Данные нарушения более выражены у испытуемых с невизуальной ведущей модальностью.

Апробация работы

Основные результаты и положения диссертации были представлены и обсуждены на научных мероприятиях: XXIII Съезд Физиологического общества им. И.П. Павлова (Воронеж, Россия, 2017), XVII Конференция молодых учёных, специалистов и студентов, посвящённая 100-летию со дня рождения академика О. Газенко (Москва, Россия, 2018), Международная конференция «International Symposium for Gravitational Physiology» (Noordwijk, Netherlands, 2018), X Всероссийская школа молодых учёных памяти академика РАН Е.Е. Никольского (Казань, Россия, 2019), Global Space Exploration Conference (GLEX) 2021 (Санкт-Петербург, Россия, 2021), IX Российская конференция с международным участием по управлению движением, посвященная 95-летию со дня рождения И.Б. Козловской (Казань, Россия, 2022), VII Съезд физиологов СНГ с международным участием (Сочи, Россия, 2022), Всероссийский симпозиум «Биомеханика-2023» (Россия, Москва, 2023), XXI Конференция молодых учёных, специалистов и студентов, посвященная 60-летию Института медико-биологических проблем (Россия, Москва, 2023), 42nd Annual ISGP Meeting (Antwerp, Belgium, 2023), XXIV Съезд Физиологического Общества им. И.П. Павлова (Россия, Санкт-Петербург, 2023), 74th International Astronautical Congress (Baku, Azerbaijan, 2023), XVIII Конференция по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием (Россия, Москва, 2023), XV Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» (Звёздный городок, 2023), XI Всероссийская с международным участием школа-конференция по физиологии мышц и мышечной деятельности, посвященная 70-летию открытия механизма мышечного сокращения (Москва, 2024).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня журнала ВАК РФ и баз данных Scopus/Web of Science, 14 тезисов докладов.

1. Амирова Л.Е., Шишкин Н.В., Китов В.В., Савеко А.А., Томиловская Е.С., Козловская И.Б. Роль зрительной обратной связи в контроле вертикальной устойчивости человека до и после 5-суточной "сухой" иммерсии // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2017. – Т. 51 – С. 31–37.
2. Шишкин Н.В., Ермаков И.Ю., Амирова Л.Е., Абу Ш.Н.М.А., Томиловская Е.С. Вертикальная устойчивость с открытыми и закрытыми глазами до и после

воздействия 21-суточной "сухой" иммерсии // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2020. – Т. 54 – С. 52–57.

3. Shishkin N., Kitov V., Sayenko D., Tomilovskaya E. Sensory organization of postural control after long term space flight // Frontiers in neural circuits. – 2023. – V. 17 – P. 1135434.

Личный вклад автора

Личный вклад автора текста, Шишкина Н.В., присутствует на каждом этапе выполнения диссертационной работы и заключается в разработке направления исследований, подготовке оборудования и проведении физиологических экспериментов, создании и модификации уже имеющихся программ для математической обработки полученных сигналов, обработке полученных данных, в том числе статистической, обобщении результатов экспериментов, написании статей и тезисов, представлении результатов работы на российских и международных конференциях.

Структура и объём диссертации

Диссертация изложена на 86 страницах, состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, результатов исследования с обсуждением в конце каждой подглавы результатов, заключения и выводов. Список литературы включает 164 источника. Работа иллюстрирована одной таблицей и 28 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследованиях до и после космического полета приняли участие 32 космонавта-участника российских космических миссий на МКС, все мужского пола (возраст: 43 ± 6 лет; рост: $175,2 \pm 3,4$ см; вес: $79,6 \pm 7,9$ кг; ИМТ: $25,1 \pm 2,2$ кг/м²). Продолжительность полётов составляла 168 ± 18 суток. Исследования проводили 5 раз: 2 раза до КП, на 3-и, 7-е и 10-е сутки после приземления. Участники были проинформированы о сути и особенностях эксперимента и подписали письменное согласие на участие. Протоколы экспериментов были одобрены биоэтической комиссией ГНЦ-ИМБП РАН и Human Research Multilateral Review Board (HRMRB).

Из модельных воздействий – антиортостатической гипокинезии и «сухой» иммерсии (СИ) – выбрана последняя как наиболее быстро и точно воспроизводящая эффекты КП (Tomilovskaya et al., 2019).

В модельных исследованиях участвовали 22 испытателя-мужчины: 12 – в 5-суточной СИ (возраст: 30 ± 7 лет; рост: 175 ± 5 см; вес: $71,2 \pm 7$ кг; ИМТ: $23,1 \pm 1,7$ кг/м²), 10 – в 21-

суточной (30 ± 5 лет, рост $177,5 \pm 3,3$ см, вес $78,6 \pm 86,2$ кг, ИМТ $25,4 \pm 3,1$ кг/м²). В 5-суточной СИ было 4 тестирования: 2 до начала СИ, через 1 час после окончания и на 2-е сутки периода восстановления; в 21-суточной СИ проводили 6 тестирований: 3 до начала СИ, через 1 час после окончания, на 2-е и на 4-е сутки периода восстановления.

Исследование вертикальной устойчивости до и после космического полёта

В данном исследовании использовали аппаратный комплекс EquiTest Neurocom и метод, основанный на работах Л. Нашнера и О. Блэка по выделению вклада отдельных сенсорных систем с помощью поочерёдного «зашумления» и «искажения» афферентного сигнала от них (Nashner et al., 1982; Black, Nashner, 1984).

При обработке данных анализировали комплексный безразмерный показатель вертикальной устойчивости Equilibrium Score (EqScore), измеряемый в баллах. Он вычислялся по формуле

$$EqScore = 1 - \frac{\alpha}{12,5^\circ} \quad (1)$$

где α – максимальный угол разброса колебаний центра тяжести в течение теста, $12,5^\circ$ – максимальный угол колебаний в нормальной популяции (Nashner, McCollum, 1985). Перемещение центра тяжести вычисляли с помощью фильтрации сагиттальной стабиллограммы фильтром высоких частот Баттерворта с частотой среза 0,85 Гц (Wood et al., 2015).

Тестирование состояло из 7 тестов (тесты 1-4 проводились 2 раза по 20 секунд с перерывом 5-10 секунд, тесты 5, 2m, 5m – 3 раза по 20 секунд, рисунок 1), чередовались условия с колебаниями опорной поверхности, зрительного окружения и головы.

Сравнение постуральной устойчивости космонавтов, летавших впервые и повторно

Сравнивали значения EqScore в группе космонавтов, принимавших участие в КП впервые (15 человек) и повторно (17 человек). Один и тот же космонавт, летавший несколько раз после 1-го полёта (2-5-й полёты), учитывался в группе повторно летавших как разные объекты (5 человек). Космонавты, летавшие впервые, не представлены в группе летавших повторно.

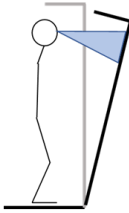
	Стандартные тесты			Модифицированные тесты
	Глаза открыты	Глаза закрыты	Глаза открыты Колеблющееся зрительное окружение	Глаза закрыты Колебания головой
Неподвижная опорная поверхность	 1	 2	 3	 2m
Колеблющаяся опорная поверхность	 4	 5		 5m

Рисунок 1. Схема экспериментальных условий проведения постуральных тестов

Влияние факторов космического полёта на кинематические характеристики постуральной устойчивости у космонавтов

Космонавты были снаряжены системой инфракрасных датчиков (NDI OptoTrack, США). Датчики крепили на правую пятку, правую подколенную впадину, правое бедро и плечо и на наушники (для контроля амплитуды и частоты качаний головой).

Для анализа кинематики движений вычисляли разброс колебаний углов в суставах – стандартное отклонение значений за время теста, по их изменению определяли вклад постуральных стратегий (Afschrift et al., 2016; Afschrift et al., 2018; Kaminishi et al., 2020, 2021). Для поддержания вертикальной стойки решающее значение имеют голеностопная и тазобедренная постуральные стратегии, коленная вносит малый вклад и чаще всего, как и в нашей работе, не рассматривается (Alexandrov et al., 2001).

Определение ведущей сенсорной модальности

Вычисляли коэффициент Ромберга (КР) – отношение разброса колебаний ЦД при вертикальной стойке с открытыми глазами к разбросу колебаний при стойке с закрытыми (Fujita et al., 2005):

$$КР = \frac{R_{\text{го на твёрдой опоре}}}{R_{\text{гз на твёрдой опоре}}} \quad (2)$$

где КР – коэффициент Ромберга, $R_{\text{го}}$ твёрдой опоре – средний разброс колебаний ЦД при открытых глазах на твёрдой опоре, $R_{\text{гз}}$ на твёрдой опоре – средний разброс колебаний ЦД при закрытых глазах на твёрдой опоре.

Данный тест определяет ведущую модальность, на которую постуральная система опирается в большей мере – визуальную, если разброс колебаний растёт при закрытии глаз, и невизуальную – если уменьшается. Людей с $КР > 1$, т.е. с ведущей визуальной модальностью, мы в нашем исследовании будем называть «визуалами», с $КР < 1$, т.е. с ведущей невизуальной модальностью, – «невизуалами» (Lacour et al., 1997).

Постуральные исследования в модельных экспериментах – сравнение результатов 5-суточной и 21-суточной СИ

В иммерсионных исследованиях мы не имели возможности использовать то же оборудование, что и у космонавтов, вследствие чего использовали иные, типичные для стабилметрических платформ (Стабилан-01, ОКБ «Ритм», Россия) показатели и батарею тестов. Тесты были аналогичны тем, которые проходили космонавты, зашумление соматосенсорного входа осуществлялось не с помощью вращающейся опорной поверхности, а с помощью мягкой подушки. Испытатели последовательно выполняли 3 теста поддержания равновесия в вертикальном положении:

- с открытыми глазами (1 раз, 1 минута, тест 1);
- с закрытыми глазами (1 раз, 1 минута, тест 2);
- с закрытыми глазами на мягкой опоре (1 раз, 1 минута, аналог теста 5 из батареи космонавтов, поролоновая подушка толщиной 20 см).

Исследовали следующие параметры: среднюю скорость и средний разброс колебаний ЦД.

Средний разброс вычисляли как среднеквадратичное значение радиуса окружности с центром с координатами, равными среднему значению сагиттальной и фронтальной координат ЦД (Fujita et al., 2005):

$$R = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{\text{cp}} - x_i)^2 + (y_{\text{cp}} - y_i)^2} \quad (3)$$

где R – средний разброс колебаний ЦД, N – количество измерений, x – фронтальная координата ЦД, y – сагиттальная координата ЦД.

Расстояние, пройденное ЦД, не рассматривали, так как оно дублирует показатель скорости; показатели скорости, полученные в разных исследованиях, можно сравнивать вне зависимости от продолжительности теста.

Статистический анализ данных

Статистический анализ проводили с помощью программы GraphPad Prism 6.

Нормальность распределения полученных данных проверяли с помощью теста Колмогорова-Смирнова. При ненормальном распределении для сравнения величин стабилметрических показателей использовали непараметрический тест Фридмана для связанных выборок с поправкой Данна на множественные сравнения. При этом, в случае отмены хотя бы одного исследования у космонавтов вследствие плохого самочувствия или других причин все данные по этому космонавту удаляли, так как данный тест не предполагает наличия выпадающих значений. В данном случае выборка сокращалась до 22 человек. В отдельных случаях для проверки наличия статистической значимости различий оценивали разницу между выборками 2-го фонового исследования и 3-х суток после приземления. В данном случае использовали непараметрический тест Вилкоксона для связанных выборок, группа увеличивалась до 28 человек (у 4-х космонавтов из 32-х исследования на 3-и сутки после приземления были отменены). В случае нормального распределения использовали модель смешанных эффектов с поправкой Гейсера-Гринхауса на множественные сравнения, предполагающую наличие выпадающих значений.

Для сравнения данных космонавтов, летавших впервые и повторно, использовали непараметрический тест Краскела-Уоллиса с поправкой Данна. Для внутригрупповых сравнений 2-х групп космонавтов использовали тесты, указанные в предыдущем абзаце, как и для сравнений стабилметрических данных у испытуемых в иммерсии. Все стабилметрические данные графически изображены в виде среднего значения и стандартного отклонения.

Для сравнения кинематических данных по углам в суставах использовали парный t-тест при нормальном распределении и непараметрический тест Вилкоксона – при ненормальном. Ввиду большой вариативности данных графики представлены в виде боксплотов с медианой, 25 и 75 перцентилем. Выбросами считались точки, значения которых были меньше 1-го квартиля за вычетом 1,5 интерквартильных интервалов, либо больше 3-го квартиля с добавлением 1,5 интерквартильных интервалов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние длительных космических полётов на параметры вертикальной стойки

Изменение стабилметрических характеристик вертикальной стойки после длительных космических полетов

На рисунках 3-6 представлены результаты двух фоновых исследований. Основное сравнение проводили со вторым (фон2) фоновым исследованием, чтобы исключить влияние обучения, предполагаемого в подобном исследовании нашими коллегами (Wood et al., 2015). Во втором фоновом исследовании значения EqScore действительно были выше, чем при первом в большинстве тестов, однако значимых различий выявлено не было.

В тесте 1 (с открытыми глазами и неподвижной опорой) обнаружено значимое снижение показателя EqScore на 3-и сутки после приземления по сравнению с предполетными показателями (с 93,5 до 90,3 баллов, $p=0,017$, рисунок 2). Средние значения показателя после посадки оставались ниже фоновых значений в течение всех 3-х послеполётных исследований. В тесте 2 (с закрытыми глазами и неподвижной опорой) изменений после космического полёта обнаружено не было.

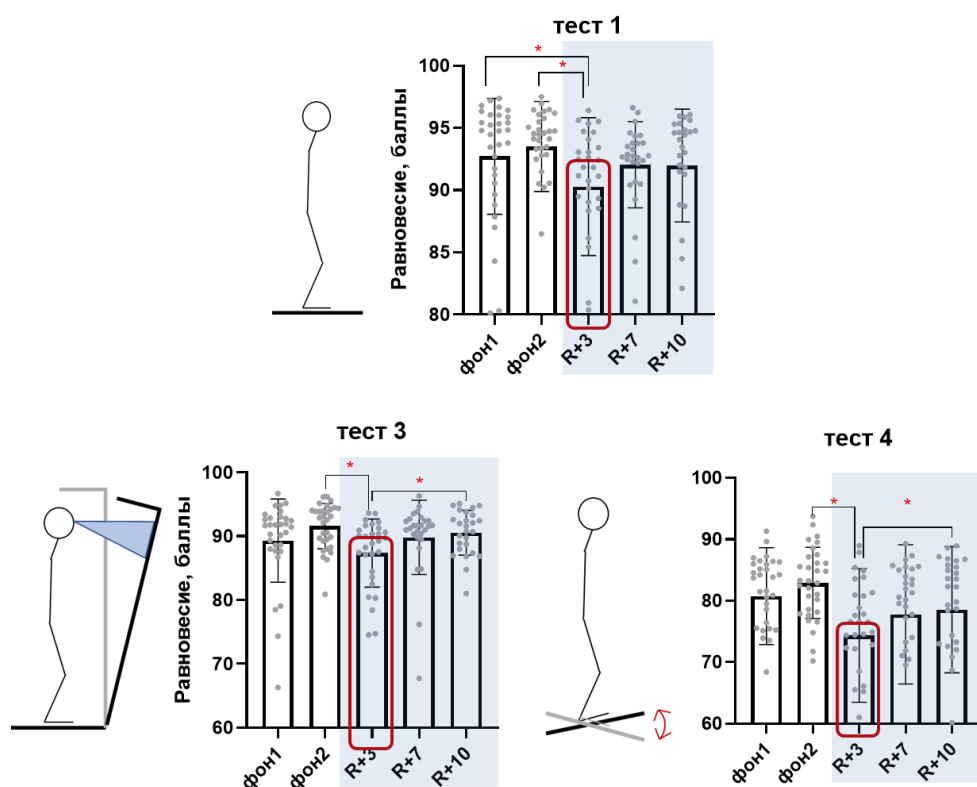


Рисунок 2. Значения EqScore до и после КП, тест 1 и тест 2. По оси абсцисс: фон1 – 1-е исследование до полёта, фон2 – 2-е, R+3 – 3-и сутки после приземления, R+7 – 7-е сутки, R+10 – 10-е сутки. * – $p<0,05$

В тесте 4 (с открытыми глазами и качающейся опорной поверхностью - искажение опорного входа) обнаружено достоверное снижение устойчивости на 3-и сутки после приземления (с 82,9 до 74,4 баллов, $p=0,0027$) и ее восстановление к 10-м суткам (с 74,5 до 78,5 баллов, $p=0,031$).

Значимые изменения наблюдались в тесте 5 (с закрытыми глазами и колеблющейся опорной поверхностью - искажение соматосенсорного входа, активное вовлечение вестибулярного входа) между 2-м фоновым исследованием и 3-ми сутками после приземления (с 69,4 до 63,4, $p=0,0004$, рисунок 3), а также значимое увеличение между 3-ми и 10-ми сутками после полета ($p=0,0034$). В тесте 5m (с закрытыми глазами, колеблющейся опорной поверхностью и качаниями головой – взаимодействие всех сенсорных систем в сложных условиях) наблюдалось значимое снижение параметра EqScore на 3-и сутки после приземления (с 48,2 до 35,9 баллов, $p=0,016$). Значимое снижение вертикальной устойчивости в этом тесте сохранялось до 7-х суток после приземления (41,1 балл, $p=0,037$). Также наблюдалось восстановление к 10-м суткам после завершения КП (до 49,5 баллов, значимое различие с 7-ми сутками, $p=0.0038$, отсутствие значимой разницы с фоном).

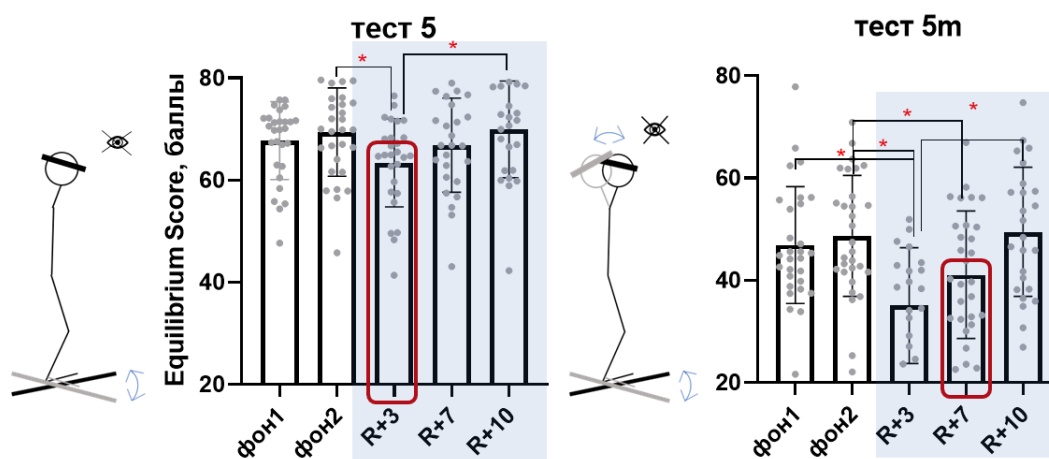


Рисунок 3. Значения EqScore до и после КП. Тест 5 и тест 5m. По оси абсцисс: фон1 – 1-е исследование до полёта, фон2 – 2-е, R+3 – 3-и сутки после приземления, R+7 – 7-е сутки, R+10 – 10-е сутки. * – $p < 0,05$

Сравнение стабилметрических данных космонавтов, летавших впервые и повторно

Ни в одном поструральном тесте не было обнаружено статистически значимых межгрупповых различий между космонавтами, летавшими впервые и повторно. Однако при рассмотрении внутригрупповых данных были найдены отличия в глубине и динамике изменений после полёта. Для удобства мы обозначим группу космонавтов, летавших впервые, группой Первого КП, повторно – группой Повторного КП.

В тесте 1 (рисунок 4) значимое снижение на R+3 наблюдалось только в группе Повторного КП. В тесте 3 статистически значимое снижение EqScore после КП наблюдалось в обеих группах космонавтов, однако значимое увеличение EqScore от сессии R+3 к R+10 было обнаружено только в группе Первого КП. В тесте 4 значимое снижение постуральной устойчивости после КП также наблюдалось в обеих группах, однако в группе Первого КП к R+10 этот эффект сохранялся, тогда как в группе Повторного КП на R+7 уже не наблюдалось значимых отличий от исходных значений.

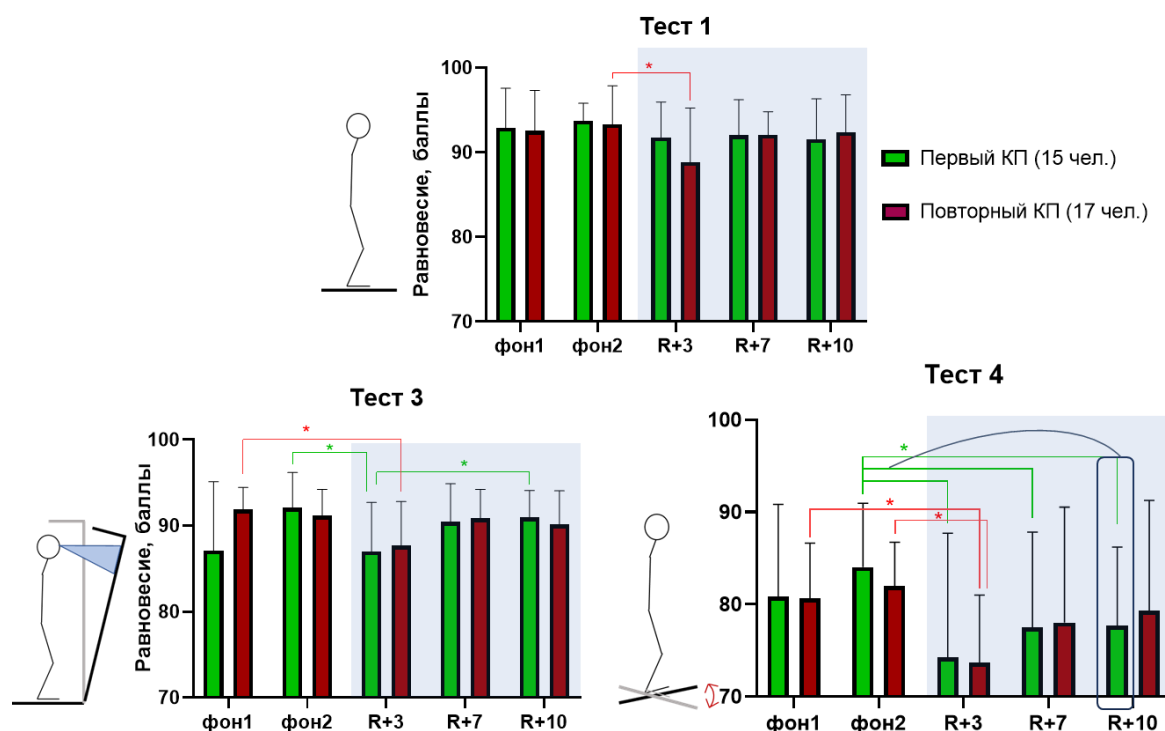


Рисунок 4. Значения EqScore до и после КП. Тесты 1, 3, 4. Группы космонавтов, летавших впервые (Первый КП) и повторно (Повторный КП). По оси абсцисс: фон1 – 1-е исследование до полёта, фон2 – 2-е, R+3 – 3-и сутки после приземления, R+7 – 7-е сутки, R+10 – 10-е сутки. *, * – $p < 0,05$

В тесте 5 (рисунок 5) значимое снижение постуральной устойчивости на R+3 наблюдалось в обеих группах. В тесте 5m значимое снижение постуральной устойчивости наблюдалось также в обеих группах, но в группе Первого КП оно сохранялось вплоть до 7-х суток после приземления, чего не наблюдалось в группе Повторного КП; также наблюдалось статистически значимое увеличение EqScore от сессии R+3 к R+10 в группе Повторного КП.

Отсутствие различий между космонавтами, летавшими впервые и повторно, по-видимому обусловлено исследованиями лишь на 3-е сутки после приземления. Тем не

менее была обнаружена различная динамика восстановления даже в периоде от 3-х к 10-м суткам после окончания КП.

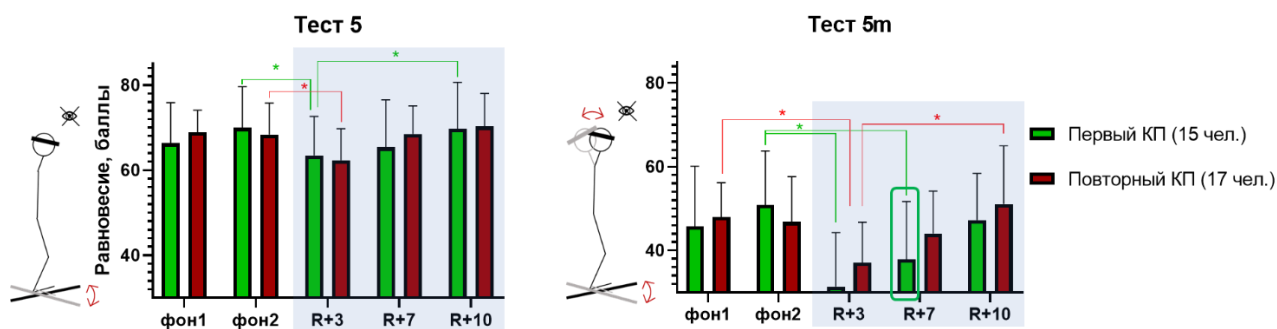


Рисунок 5. Значения EqScore до и после КП. Тест 2 и тест 2m. Группы космонавтов, летавших впервые (Первый КП) и повторно (Повторный КП). По оси абсцисс: фон1 – 1-е исследование до полёта, фон2 – 2-е, R+3 – 3-и сутки после приземления, R+7 – 7-е сутки, R+10 – 10-е сутки. *, * – $p < 0,05$

Известно, что вестибулярная функция космонавтов, совершавших длительный КП повторно, восстанавливается после приземления быстрее, чем у летавших впервые (Наумов и др., 2015; Schoenmaekers et al., 2022). Следует отметить, что в указанных исследованиях космонавты принимали участие уже на 1-2-е сутки после приземления, когда и наблюдались наиболее выраженные нарушения вестибулярной функции с наличием атипичных вестибулярных реакций. Вероятно, при проведении постуральных исследований в более ранние сроки (на R+1-R+2 сутки после КП) различия между космонавтами, совершавшими первый и повторный полёты, проявились бы.

Примечательно, что значимое снижение равновесия на 3-и сутки после приземления, наблюдаемое в общей группе в самом простом тесте (с открытыми глазами на неподвижной опоре) присутствовало только в группе космонавтов, осуществлявших повторные полёты. Возможно, в данном случае имеет значение тот факт, что возраст космонавтов, летавших впервые, был достоверно меньше, чем летавших повторно ($41,6 \pm 3,6$ и $48,4 \pm 5,3$ года).

Роль ведущей сенсорной модальности

Большинство космонавтов – 25 из 32 – вошли в «визуальную» группу (имели КР больше 1). Значимое межгрупповое отличие 3-и сутки после полёта наблюдалось только в тесте 1 (с открытыми глазами). Это отличие имело высокую статистическую значимость ($p < 0,0001$), показатель в «невизуальной» группе был ниже на 9,6% (83,5 и 92,4 баллов), однако в тестах 1, 4, 5 и 2m «невизуалы» имели достоверно более низкий показатель EqScore и до полёта.

*Влияние факторов космического полёта на кинематические характеристики
постуральной устойчивости*

Во всех тестах, кроме теста 5, был обнаружен значимый рост разброса колебаний. Стоит отметить, что в тестах, указанных на рисунке 6, разброс колебаний в голеностопном суставе после КП увеличивался по сравнению с дополётными измерениями больше, чем в тазобедренном. Это говорит о большем увеличении вклада голеностопной стратегии поддержания равновесия по сравнению с тазобедренной.

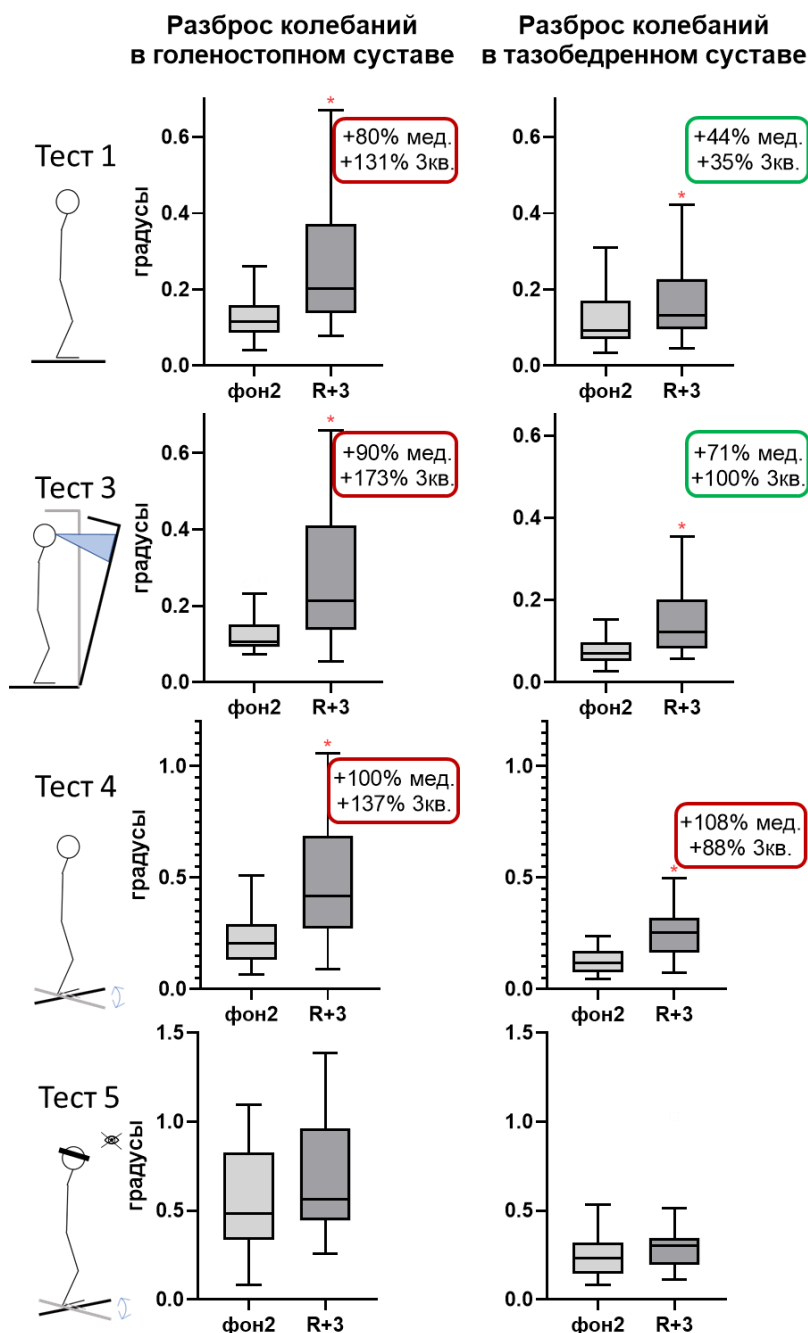


Рисунок 6. Разброс колебаний в голеностопном и тазобедренном суставе до полёта (фон2) и через 3-е суток после посадки (R+3). мед. – медиана, 3 кв. – 3-й квартиль. * - $p < 0,05$ – достоверное различие между сессиями

В тесте 4 (открытые глаза, колеблющаяся опорная поверхность, рисунок 7) наблюдали значимый рост разброса колебаний в тазобедренном суставе на 3-и сутки после завершения КП (с $0,12^\circ$ до $0,25^\circ$, $p < 0,0001$). Однако также наблюдали и значимый рост разброса колебаний между тестом 1 (с неподвижной платформой) и тестом 4 после КП (с $0,13^\circ$ до $0,25^\circ$, $p < 0,0045$), не выявлявшийся до полета. Это говорит о том, что до КП при искажении соматосенсорного входа не наблюдалось подключения тазобедренной стратегии, но после КП её вклад в вертикальную устойчивость значимо возрастал.

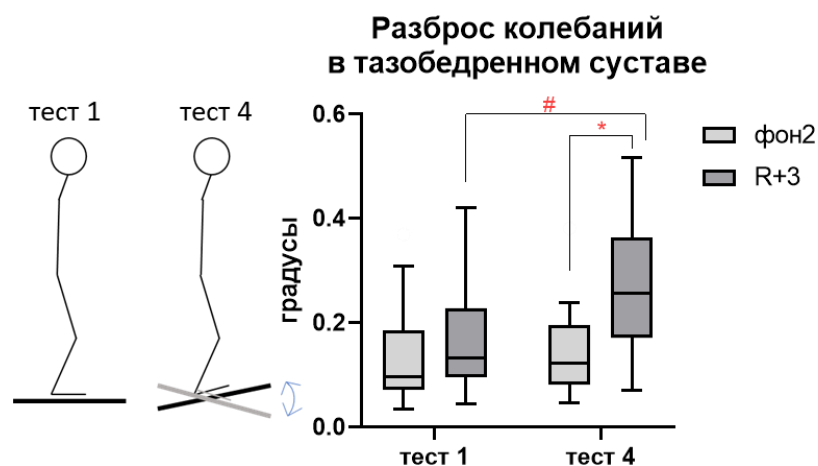


Рисунок 7. Разброс колебаний в голеностопном и тазобедренном суставах в тесте с открытыми глазами, подвижным зрительным окружением и неподвижной опорой (тест 3) до полёта (фон2) и через 3-е суток после посадки (R+3). * – $p < 0,05$ – достоверное различие между дополётной и послеполётной сессией, # – $p < 0,05$ – достоверное различие между тестами

В тесте 5m (закрытые глаза, колеблющаяся опорная поверхность, качания головой, рисунок 8) были обнаружены значимые изменения разброса колебаний в голеностопном (с $0,90^\circ$ до $1,3^\circ$, $p < 0,001$) и тазобедренном суставах (с $0,3^\circ$ до $0,72^\circ$, $p < 0,001$). Относительное увеличение разброса колебаний в тазобедренном суставе (+140%) более чем в 3 раза превышало таковое в голеностопном (+44%). Увеличение 3-го квартиля разброса колебаний в тазобедренном суставе (+152%) также было гораздо больше, чем в голеностопном (+63%). Это иллюстрирует увеличение вклада тазобедренной стратегии поддержания равновесия в этом тесте (Kaminishi et al., 2021).

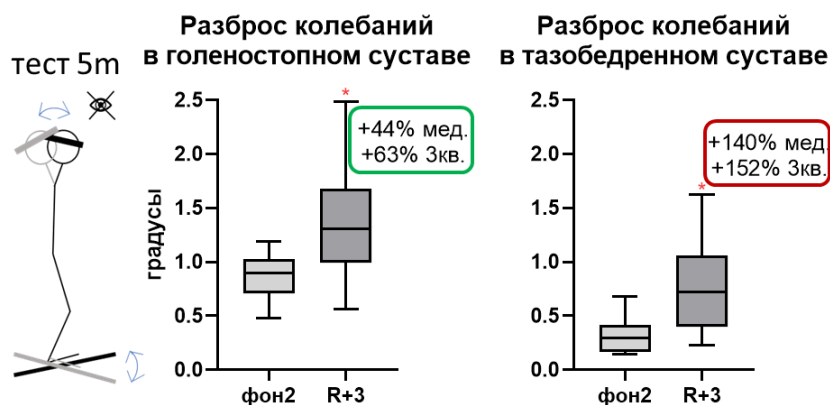


Рисунок 8. Разброс колебаний в голеностопном и тазобедренном суставах в тесте с закрытыми глазами, подвижным зрительным окружением, подвижной опорой и с качанием головой (тест 5m) до полёта (фон2) и через 3-е суток после посадки (R+3). мед. – медиана, 3кв. – 3-й квартиль. * – $p < 0,05$ – достоверное различие между дополётной и послеполётной сессией

Таким образом, были выявлены изменения в поздних стратегиях, которые космонавты использовали после КП в условиях, когда проприоцептивные или вестибулярные сигналы были искажены и вестибулярный вход был критичным для поддержания равновесия (тесты 4, 5m). Другие исследования (Speers et al., 1998) также отмечали повышение вклада тазобедренной стратегии в этих тестах в течение нескольких часов после завершения кратковременного КП (от 7 до 16 дней), а также отсутствие изменений в тесте 5 (закрытые глаза, колебания опорной поверхности). Недавние исследования сообщают об обновлении мозжечковой внутренней модели сенсорного восприятия силы тяжести, и о переоценке экстравестибулярной информации в условиях КП (Carriot et al., 2021). Предыдущие исследования также объясняли увеличение вклада тазобедренной стратегии изменениями в центральной обработке сенсорной информации (Speers et al., 1998).

Влияние 5-суточной и 21-суточной «сухой» иммерсии на параметры вертикальной стойки испытуемых-добровольцев

Результаты послеполётных тестов космонавтов сравнивали со средним значением второго фонового исследования. Это было обусловлено различиями (недостоверными) в показателях между двумя фоновыми тестированиями. В иммерсионных исследованиях тенденции к увеличению поструральной устойчивости во втором фоне по сравнению с первым не отмечалось, поэтому результаты, полученные после СИ, сравниваются со средним значением фоновых тестов.

В фоновых исследованиях показатели групп 5-суточной и 21-суточной иммерсии значимо не различались.

После воздействия безопорности в обеих группах наблюдалось увеличение скорости колебаний ЦД и при обычной стойке – на твёрдой опоре с открытыми глазами (на 14,6% в 21-суточной СИ и на 22,1% – в 5-суточной СИ), и при стойке с закрытыми глазами (на 25,1% в 21-суточной СИ и на 8,3% - в 5-суточной СИ, рисунок 9). Однако после 21-суточной СИ при закрытых глазах это увеличение было значимым ($p=0,002$), сохраняясь вплоть до 2-х суток после окончания воздействия, в то время как изменения после 5-суточной СИ не достигали уровня достоверности.

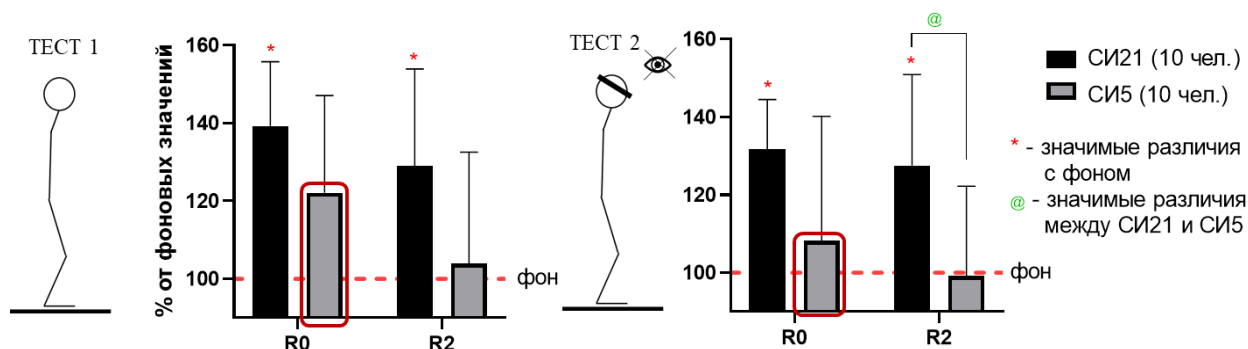


Рисунок 9. Изменение скорости колебаний ЦД на твёрдой опоре с открытыми и закрытыми глазами после завершения СИ через 1 час, в течение которого сохранялось горизонтальное положение тела (R0), и через 2-е суток (R+2) по сравнению со значениями, полученными до воздействия

В тесте с закрытыми глазами на твёрдой и мягкой опоре не наблюдалось изменений разброса колебаний ЦД после 21-суточной СИ. Однако наблюдалось значимое увеличение этого показателя в тесте с закрытыми глазами на мягкой опоре после 5-суточной СИ (на 67,9%, $p=0,0046$, рисунок 10), а также значимое различие между воздействием короткой и длительной СИ на вестибулярную и проприоцептивную системы, выражающееся в достоверном различии между изменениями разброса колебаний ЦД при стойке на мягкой опоре в 5-суточной и 21-суточной СИ ($p=0,0022$).

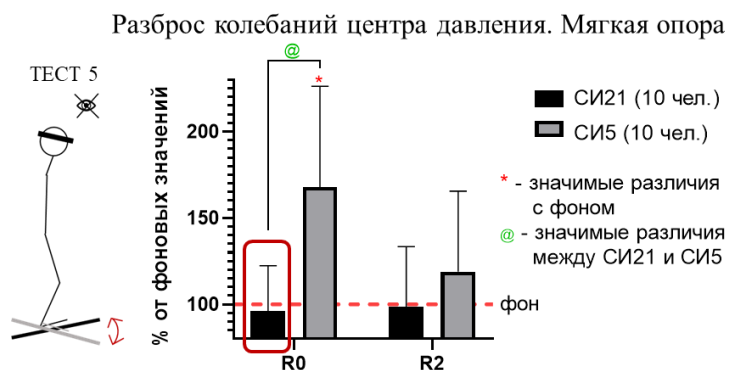


Рисунок 10. Изменение разброса колебаний ЦД после завершения СИ: через 1 час, в течение которого сохранялось горизонтальное положение тела (R0), и через 2-е суток (R+2) по сравнению со значениями, полученными до воздействия

По ведущей сенсорной модальности испытуемые разделились почти равномерно. В группу «визуалов» попали 4 человека, участвовавших в 21-суточной СИ, и 6 человек, участвовавших в 5-суточной СИ. В группу «невизуалов» соответственно попали 6 человек, участвовавших в 21-суточной СИ, и 4 человека, участвовавших в 5-суточной СИ. После иммерсионного воздействия значения коэффициента Ромберга (КР), с помощью которого определялась ведущая сенсорная модальность, у участников по-прежнему оставались либо больше, либо меньше единицы.

При отдельном рассмотрении групп «визуалов» и «невизуалов» в 5-суточной СИ было обнаружено, что значимый рост разброса колебаний в тесте с закрытыми глазами на мягкой платформе обусловлен в большей мере изменениями, происходящими в группе «невизуалов» (рисунок 11).

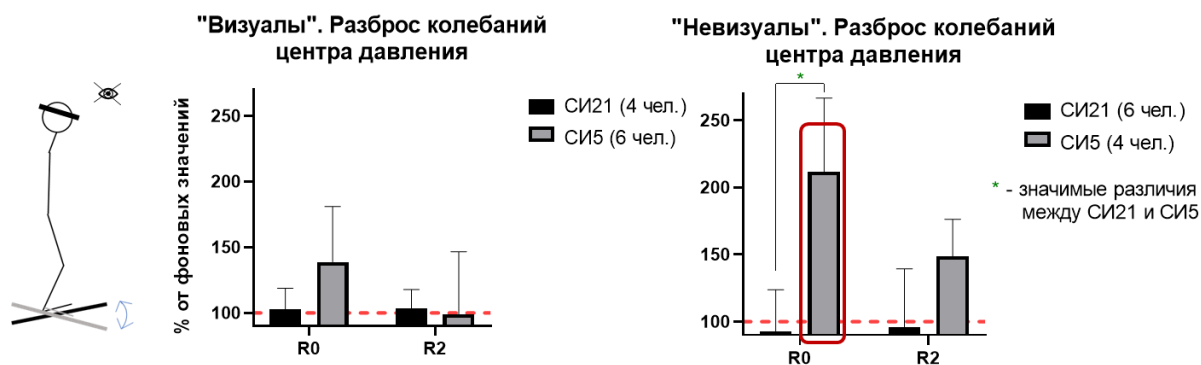


Рисунок 11. Сравнение изменений в разбросе колебаний ЦД на мягкой опоре с закрытыми глазами после 5-суточной и 21-суточной СИ в группе с визуальной и невизуальной ведущей сенсорной модальностью через 1 час, в течение которого сохранялось горизонтальное положение тела (R0), и через 2-е суток (R+2) после окончания иммерсионного воздействия относительно исходных значений

Результаты данного исследования показывают, что безопорность разной продолжительности оказывает различное влияние на систему поддержания вертикальной позы. 5-суточное иммерсионное воздействие приводило к изменениям, связанным с интеграцией вестибулярного аппарата в поддержание равновесия, 21-суточное – к связанным с интеграцией проприоцептивной системы. При этом изменения интеграции вестибулярной афферентации в большей мере происходили у испытуемых с невизуальной ведущей сенсорной модальностью.

Ранее было показано, что при стойке на неподвижной горизонтальной поверхности имеет место избыточность сенсорной информации (Tjernström et al., 2015), которая позволяет неосознанно выбирать менее надежную стратегию поддержания вертикальной позы. Возможно, «невизуалы» в меньшей степени ориентировались на информацию, поступающую от вестибулярного аппарата (Корнилова и др., 2011), и, вероятно, устранение

зрительной обратной связи приводило к дефициту соматосенсорной информации и, как следствие, - к уменьшению разброса колебаний, что является более надежной стратегией поддержания равновесия. К примеру, ранее показано, что при усложнении задачи по поддержанию равновесия у пациентов с дефицитом соматосенсорной информации визуальные сигналы могут дестабилизировать стойку (Kim et al., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа демонстрирует результаты постуральных исследований большой выборки космонавтов-участников длительных экспедиций на МКС – 32 человека, и впервые представляет вниманию сравнение эффектов короткой 5-суточной и длительной 21-суточной опорной разгрузки с помощью модели «сухой» иммерсии на постуральную устойчивость испытуемых-добровольцев.

Полётный опыт космонавтов влияет на динамику восстановления постуральной устойчивости после завершения полета. Уже на 7-е сутки после приземления у космонавтов, совершавших длительный космический полёт повторно, не наблюдается значимых различий с предполётными величинами. Это было обнаружено в постуральном тесте, который требует активного вовлечения работы вестибулярного аппарата, из чего можно сделать вывод об адаптации вестибулярной функции к восстановлению после длительного воздействия микрогравитации при повторных длительных космических полётах.

Длительное время после окончания полёта, до 3-х суток, сохраняются изменения в координационной структуре движения при поддержании равновесия. Данные исследования позволяют оценить не только внешнюю, механическую картину изменения поддержания равновесия, но и сделать предположение о работе внутренних, центральных механизмов поддержания позной устойчивости, их изменчивости и динамике восстановления. Сенсомоторная система, вследствие длительного отсутствия действия силы тяжести, частично теряет способность выполнять сложнокоординированные движения и переключается на более простые в управлении, но более энергозатратные движения.

Впервые выдвинуто предположение, что короткого воздействия достаточно для воспроизведения эффектов микрогравитации на вовлечение вестибулярного аппарата в поддержание вертикальной устойчивости, в то время как длительная опорная разгрузка необходима для моделирования воздействия на проприоцептивное звено.

При этом показано, что ведущая сенсорная модальность, визуальная или невизуальная, может быть значимым предиктором и вероятно признаком степени влияния

опорной разгрузки на вовлечение вестибулярного аппарата в поддержание вертикальной устойчивости.

ВЫВОДЫ

1. После длительного космического полёта наблюдаются достоверные изменения в параметрах вертикальной устойчивости: увеличение скорости и разброса колебаний в различных сенсорных условиях (открытые/закрытые глаза, твердая/мягкая опора).
2. Восстановление постуральной устойчивости после длительных космических полётов в условиях, требующих усиленного участия вестибулярного аппарата, происходит в более длительные сроки, чем постуральной устойчивости, требующей большего вовлечения проприоцептивного входа.
3. Восстановление постуральной устойчивости в условиях, требующих усиленного участия вестибулярного аппарата, после длительных космических полётов, совершаемых повторно, происходит быстрее, чем после длительных полётов, совершаемых впервые.
4. После длительных космических полётов изменения постуральной стратегии сохраняются до 3-х суток после приземления, что может свидетельствовать о длительных изменениях центральной обработки информации, приводящих к выбору более простых в исполнении, но более энергозатратных движений для поддержания равновесия.
5. Эффекты опорной разгрузки различаются в зависимости от длительности воздействия. После короткого (5 суток) воздействия наибольшему влиянию подвергается вклад вестибулярной информации в поддержание стойки, при длительном воздействии (21 сутки) проявляются более общие эффекты, связанные с вовлечением проприоцептивной системы.
6. Преимущественная ориентация системы контроля вертикальной стойки на визуальную информацию является признаком большей устойчивости к воздействию безопорности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Хочу выразить благодарность научному руководителю моей работы, Томиловской Елене Сергеевне, за найденное в сложном рабочем графике время, уделённое моей работе и за организацию уникальных экспериментов, в которых мне довелось участвовать.

Выражаю глубокую благодарность Амировой Любове Дмитриевне, которая при моём появлении в лаборатории взяла на себя непосредственную работу по моему обучению методикам и научной работе в принципе.

Хочу выразить благодарность Наумову Ивану Андреевичу за внимательное прочтение работы и помощь с верным представлением результатов.

Выражаю благодарность своим оппонентам – Кубряку Олегу Витальевичу и Захарьевой Наталье Николаевне за внимательное прочтение работы и свежий взгляд со стороны.

Не забываю и рецензента своей работы, Виноградову Ольгу Леонидовну, за помощь с верными формулировками и помощь в доведении текста до заслуживающего представления научной публике.

Отдельно хочу поблагодарить Китова Владимира Валерьевича, побудившего меня научиться программировать и помогавшим с обработкой сигналов различных датчиков.

И отдельно хочу вспомнить Инесу Бенедиктовну Козловскую – выдающегося учёного советской и российской космонавтики, без многолетней работы которой была бы невозможна наша сегодняшняя деятельность.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КП – космический полёт

СИ – «сухая» иммерсия

ИМТ – индекс массы тела

КР коэффициент Ромберга

МКС – международная космическая станция

ЦД – центр давления

ЦТ – центр тяжести

EqScore – Equilibrium Score

R – rest