

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПИЛОТИРУЕМЫХ ПОЛЕТОВ В КОСМОС

THEORY AND PRACTICE OF HUMAN SPACE FLIGHTS

УДК 004.896:629.78.007

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕСТИБУЛЯРНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КОСМОНАВТОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ: ПОСТАНОВКА, ПРОВЕДЕНИЕ, РЕЗУЛЬТАТЫ

В.А. Дикарев, А.Н. Симбаев, А.Ю. Кикина, Ю.С. Чеботарев,
Э.В. Никитов, Ю.С. Агаркова, Д.Н. Луцевич, Я.Ю. Миняйло,
Т.Б. Кукоба, К.С. Киреев

Докт. техн. наук, проф. В.А. Дикарев; канд. техн. наук, доц. А.Н. Симбаев;
космонавт-испытатель отряда космонавтов ГК «Роскосмос» А.Ю. Кикина;
Ю.С. Чеботарев; Э.В. Никитов; Ю.С. Агаркова; Д.Н. Луцевич; Я.Ю. Миняйло;
канд. пед. наук Т.Б. Кукоба; канд. мед. наук К.С. Киреев
(ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»)

В статье рассматриваются этапы проведения экспериментальных исследований, направленных на изучение изменения вестибулярной устойчивости космонавтов при моделировании воздействия раздражающих вестибулярный аппарат факторов в виртуальной среде деятельности. Рассматривается работа космонавтов по заранее разработанным сценариям при управлении робототехнической системой антропоморфного типа в виртуальной среде. Проведен анализ возможности выполнения разработанных сценариев, проанализированы результаты проведенных исследований, рассмотрены возможности применения методики воздействия раздражающих в виртуальной реальности факторов на вестибулярную функцию с целью поддержания ее устойчивости и проведения тренировок на борту пилотируемого космического аппарата, что актуально при работе на Российской орбитальной станции и для длительных полетов при освоении космических тел Солнечной системы (Луны, Марса и т. д.), а также для профессионального и пролонгированного отбора кандидатов в космонавты и космонавтов в составе экипажей, тестирования индивидуального и коллаборативного выполнения ими операций по управлению робототехническими системами в виртуальной среде.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, вестибулярная устойчивость, виртуальная среда, антропоморфный робот, вестибуло-вегетативные реакции, оптокинетический раздражитель

**Experimental Studies of Cosmonauts' Vestibular Stability
When Controlling Robotic Systems in a Virtual Environment:
Formulation, Implementation, Results. V.A. Dikarev, A.N. Simbaev,
A.Yu. Kikina, Yu.S. Chebotarev, E.V. Nikitov, Yu.S. Agarkova,
D.N. Lutsevich, Ya.Yu. Minyailo, T.B. Kukoba, K.S. Kireev**

The paper considers the stages of experimental studies of the changes of cosmonauts' vestibular stability when simulating the effects of irritants on human vestibular apparatus during activity in a virtual environment. Activity of cosmonauts is considered in relation to specific scenarios of controlling the robotic systems of an anthropomorphous type in a virtual environment. The paper also gives an analysis of the possibility of performing the developed scenarios, the results of the studies carried out, the feasibility of applying the methodology of affecting the human vestibular function under virtual reality conditions in order to maintain its stability and to provide training onboard manned space complexes. All the above said is important for the future Russian Orbital Station and for long-duration missions to the Moon, Mars and other cosmic bodies in the Solar system as well as for professional and prolonged selection of cosmonaut candidates and crew training, testing of both individual and collaborative control of robotic systems by crew members in a virtual environment.

Keywords: experimental studies, vestibular stability, virtual environment, anthropomorphic robot, vestibular-vegetative reactions, optokinetic stimulus

Выполнение задач, направленных на обеспечение длительного космического полета и освоение космических тел Солнечной системы (в первую очередь, Луны, как ближайшей цели для освоения ведущими космическими державами), подразумевает решение широкого спектра технических, медицинских, экономических и других вопросов. Одним из актуальных направлений исследования адаптации человека к космическому полету является исследование вестибулярной функции и формирование предложений для повышения ее устойчивости к воздействию факторов космического полета. К настоящему времени накоплен опыт применения робототехнических систем (РТС) космического назначения (КН), включая экспериментальные исследования (ЭИ), проведенные во время подготовки и выполнения изоляционного эксперимента «Сириус-21/22» по направлению «Космическая робототехника», в которых рассмотрены некоторые аспекты использования РТС для поддержания операторской деятельности экипажей при реализации перспективных пилотируемых космических программ [1]. Результаты этих ЭИ учтены при разработке предложений по созданию комплексного стенда-тренажера (КСТ) РТС в продолжение дальнейшего развития существующего универсального компьютерного стенда (УКС) РТС [2]. КСТ РТС позволит осуществлять подготовку космонавтов к управлению РТС КН для выполнения совместных операций при ограничениях функциональных возможностей членов экипажа в условиях факторов длительной космической экспедиции, проведение целевых работ по космической робототехнике, а также формировать у космонавтов умения и навыки управления РТС, в том числе антропоморфного типа

(АТ), включая исследования и экспериментальную отработку проблемных вопросов взаимодействия космонавтов с РТС.

Постановка экспериментальных исследований вестибулярной устойчивости космонавтов при управлении робототехническими системами в виртуальной среде

В ходе исследований в рамках изоляционного эксперимента было обращено внимание, в частности, на проявление вестибулярного дискомфорта у операторов при продолжительном использовании шлема виртуальной реальности (ШВР) [1], что явилось основанием для проведения дополнительных ЭИ вестибулярной устойчивости (ВУ) космонавтов в виртуальной среде (ВС) при управлении РТС.

Следует отметить, что вестибулярная функция необходима для поддержания правильного положения и ориентации тела в пространстве, в основе которой лежат механизмы интеграции сенсорной информации, поступающей от различных анализаторов. Несогласованность между поступающими потоками сенсорных сигналов приводит к вестибулярной дисфункции, что выражается в появлении головокружения, тошноты, потери ориентации в пространстве, иллюзорном ощущении движения собственного тела [3]. Устойчивая работа вестибулярной функции крайне важна для космонавтов при выполнении миссии пилотируемого космического полета в условиях невесомости и динамических перегрузок [4].

Существуют различные подходы к регистрации отклонений вестибулярной системы человека, например, в источнике [5] приводится подход к изучению вестибулярной функции групп людей (фигуристов, футболистов и ушуистов) с применением технологий виртуальной реальности с регистрацией движения глаз. Предлагаемый подход заключается в анализе изменения вестибулярной функции испытуемых при работе в очках виртуальной реальности (ОВР) в специально разработанных для целей испытаний виртуальных сцен.

В процессе медицинского освидетельствования космонавтов ВУ оценивается с помощью вестибулометрических проб, основанных на непрерывной кумуляции ускорений Кориолиса (НКУК) по методике С.С. Маркаряна и прерывистой кумуляции ускорений Кориолиса (ПКУК) по методике И.И. Брянова. При выполнении пробы НКУК на фоне постоянного равномерного вращения кресла со скоростью 180 градусов в секунду (один оборот за 2 секунды) космонавт в конце пятого оборота начинает выполнять наклоны головы от плеча к плечу на угол не менее 30 градусов в каждую сторону от вертикали. Каждое движение головой от плеча к плечу выполняется плавно за 2 секунды.

Для проведения вестибулярных исследований использовалось специализированное программное обеспечение (ПО) УКС РТС, моделирующее

вращение космонавта на виртуальном антропоморфном роботе (АР) с частотой один оборот за 2 секунды, с одновременным наклоном торсового модуля АР вправо и влево с той же частотой.

Для контроля функционального состояния космонавта использовалась система медицинского контроля (СМедК), а также стабилоанализатор «Стабилан-01-2» (ЗАО ОКБ «РИТМ», Таганрог, Россия) для контроля перемещения центра массы космонавта относительно исходного положения. СМедК позволяет осуществлять контроль, регистрацию и анализ параметров электрокардиограммы (ЭКГ) космонавта во время исследования (сердечный ритм, проводимость и их нарушения, частота сердечных сокращений (ЧСС), анализ положения сегмента ST).

Проведение экспериментальных исследований вестибулярной устойчивости космонавтов при управлении робототехническими системами в виртуальной среде

ЭИ проводились в два этапа. При проведении первого этапа ЭИ космонавт, облаченный в мобильный задающего устройства копирующего типа (ЗУКТ-М) и ШВР (рис. 1) с закрепленными на нем датчиками СМедК «Кардиотехника-07-АД-3/12Р» (рис. 2), находясь в положении «стоя» на платформе «Стабилан-01-2» (см. рис. 3), выполнял работу по управлению АР в ВС, установленным на лунном ровере (ЛР) (см. рис. 4), перемещаемым



Рис. 1. Оператор, облаченный в ЗУКТ-М и ШВР



Рис. 2. Вариант размещения датчиков СМедК «Кардиотехника-07-АД-3/12Р» на операторе



Рис. 3. Платформа «Стабилан-01-2»

по лунной поверхности ассистентом космонавта к пунктам сбора лунных камней по заданным сценариям (см. рис. 5–7) и под непосредственным контролем медицинского персонала и технических специалистов за его физиологическим состоянием.

Второй этап ЭИ дополнен выполнением фоновых тестов до и после управления АР в ВС, заключающихся в визуальной фиксации космонавтом в ВС заданного объекта при типовых вращениях и наклонах АР (см. рис. 8).



Рис. 4. Виртуальная модель АР на ЛР



Рис. 5. Маршрут перемещения ЛР для сценария № 1

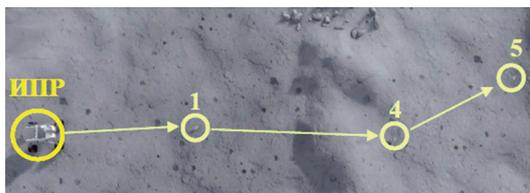


Рис. 6. Маршрут перемещения ЛР для сценария № 2

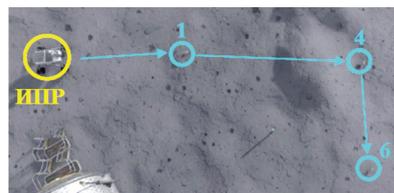
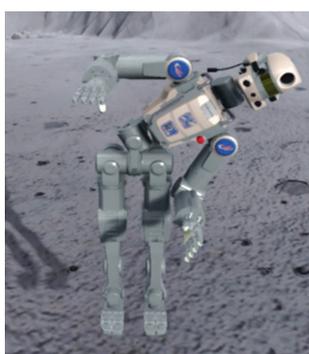


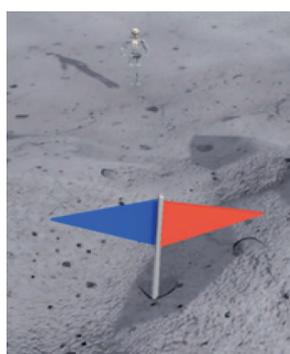
Рис. 7. Маршрут перемещения ЛР для сценария № 3



а



б



в

Рис. 8. Виртуальная сцена выполнения фонового теста:
а – исходное положение АР; б – наклон торса АР; в – наблюдаемый объект

В качестве объекта ЭИ рассматривался космонавт, выполняющий роль оператора РТС АТ и задачи управления АР в ВС посредством ЗУКТ. Цель ЭИ заключалась в определении ВУ космонавта при управлении РТС АТ в ВС.

По последним результатам вестибулометрической пробы НКУК, проведенной в рамках динамического медицинского контроля, ВУ всех космонавтов имела удовлетворительный и хороший уровень (отсутствовали резко выраженные вегетативные реакции и значительные колебания ЧСС).

Проведение ЭИ одобрено Комиссией по биомедицинской этике ЦПК имени Ю.А. Гагарина. В соответствии с Хельсинской декларацией все испытуемые подписали информированное согласие на участие в ЭИ.

Результаты первого этапа экспериментальных исследований вестибулярной устойчивости космонавтов в виртуальной среде

Исследования проводились с участием четырех космонавтов (К1, К2, К3, К4), мужчин. Из них трое имели опыт космического полета, один – без опыта космического полета. До и после ЭИ проводился медицинский осмотр космонавтов. Для оценки влияния ЭИ по робототехнике на ВУ и параметры сохранения вертикальной позы на стабиланализаторе «Стабилан-01-2» до и после управления в ВС АР проводились стабилметрические пробы: проба Ромберга с открытыми и закрытыми глазами.

В процессе исследования космонавты не предъявляли активных жалоб на состояние здоровья, наличие вестибуло-вегетативных реакций отрицали. Сенсорных и сенсомоторных нарушений не выявлено. Выраженных изменений во внешнем виде, поведении и характере движений не отмечалось. На ЭКГ регистрировался синусовый ритм, нарушений ритма и проводимости сердца не отмечалось.

Значимой динамики в изменении частоты сердечных сокращений ЧСС до и после исследования не выявлено, максимальная ЧСС во время исследования соответствовала выполненной работе (см. рис. 9).

Наибольшее зарегистрированное значение ЧСС не достигло субмаксимальных значений для космонавтов, что указывает на легкую степень тяжести физической нагрузки. Процентное отношение наибольшей зарегистрированной ЧСС за время эксперимента к максимальной ЧСС космонавтов составило менее 70 %.

В результате анализа трех основных стабилметрических параметров поддержания вертикальной позы (коэффициента функции равновесия (КФР), площади эллипса, средней скорости изменения центра давления (скорость)) не было выявлено статистически значимых изменений. На рис. 10 представлены сравнительные диаграммы трех основных стабилметрических параметров в тестах до и после работы в ВС на первом этапе ЭИ.

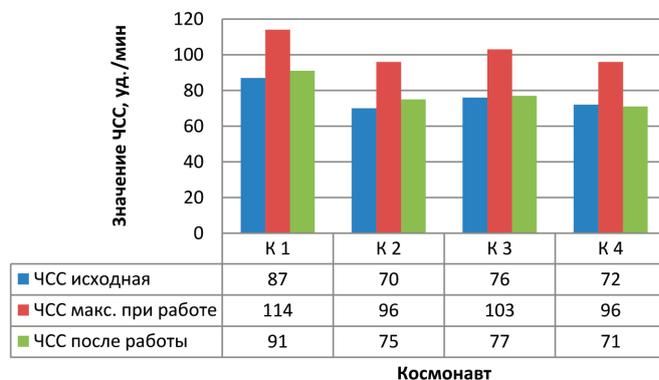


Рис. 9. Динамика ЧСС при выполнении первого этапа ЭИ

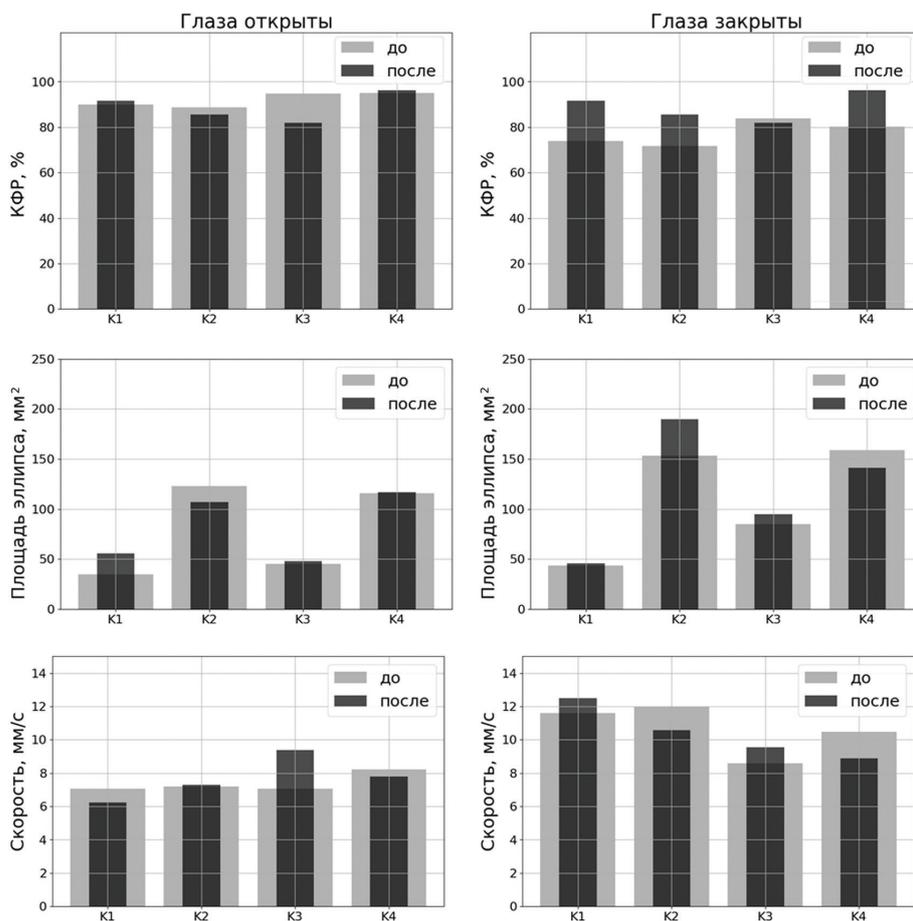


Рис. 10. Изменения показателей ВУ космонавтов в тесте Ромберга до и после выполнения управления РТС в ВС на первом этапе ЭИ

Данные объективных физиологических показателей космонавтов после исследования (артериальное давление (АД), ЧСС и температура тела) незначительно отличались от данных, полученных во время медицинского осмотра перед исследованием, и находились в пределах физиологической нормы. Циклограмму исследования космонавты выполнили полностью. Все изменения функционального состояния космонавтов носили временных характер.

При выполнении циклограммы данного исследования имело место появление утомления, чувства напряжения в глазах, а также незначительного головокружения и головной боли. Данные изменения в самочувствии космонавтов, возможно, связаны с длительным периодом использования ШВР и нахождением в вертикальном положении.

Результаты ЭИ первого этапа выявили различную ВУ космонавтов в ВС. Однако сделать окончательные выводы о влиянии длительной работы в ВС по робототехнике на параметры поддержания вертикальной позы и тенденций ВУ не представлялось возможным. Для продолжения ЭИ требуется увеличить количество участников для получения статистически более значимой выборки, а также обеспечить в ВС аналогии с вращающимся креслом вестибулометрического стенда и наклонами головы космонавта. В связи с этим был проведен второй этап ЭИ.

Результаты второго этапа экспериментальных исследований вестибулярной устойчивости космонавтов в виртуальной среде

В ЭИ приняли участие пять космонавтов (К1, К2, К3, К4, К5): четыре космонавта выполнили по одному космическому полету, один не имел опыта космических полетов. До и после ЭИ проводился медицинский осмотр космонавтов.

Для более детального анализа ВУ стабилметрические пробы, проводимые на первом этапе до и после управления в ВС АТ (проба Ромберга с открытыми и закрытыми глазами), были дополнены пробами с поворотами головы (вправо, вверх и прямо) с закрытыми глазами. В тестах с поворотами головы космонавт стоял на стабиллоплатформе ровно, с закрытыми глазами. По команде он поворачивал голову вправо и сохранял равновесие в таком положении в течение 20 секунд. Затем, снова по команде, он поворачивал голову вверх и прямо, также сохраняя равновесие по 20 секунд в каждом положении.

Тесты с поворотами головы проводились до и после каждого сеанса управления РТС АТ в ВС. Сеансов было два, поэтому результаты проб с поворотами головы обозначены как тест № 1 – для первого сеанса и тест № 2 – для второго сеанса. Для оценки ВУ анализировались изменения тех же трех основных стабилметрических параметров как на первом этапе исследования (площадь эллипса, средняя скорость изменения центра давления, КФР), а так же

дополнительный комплексный показатель – коэффициент резкого изменения направления движения (КРИНД). В процессе исследования космонавты также не предъявляли активных жалоб на состояние здоровья, наличие вестибуло-вегетативных реакций отрицали. Выраженных изменений во внешнем виде, поведении и характере движений не отмечалось. На ЭКГ регистрировался синусовый ритм, нарушений ритма и проводимости сердца не отмечалось.

Значимой динамики в изменении ЧСС не выявлено. Как и ожидалось, наибольшая интенсивность нагрузки, выражающаяся в реакции ЧСС, зафиксирована при выполнении космонавтами задач управления РТС АТ в ВС (рис. 11). Наибольшее зарегистрированное значение ЧСС не достигло субмаксимальных значений для космонавтов, что указывает на легкую степень тяжести физической нагрузки. Процентное отношение наибольшей зарегистрированной ЧСС за время эксперимента к максимальной ЧСС космонавтов составило менее 70 %.

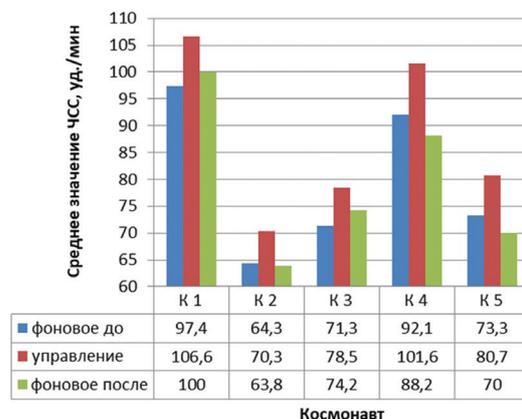


Рис. 11. Динамика ЧСС при выполнении второго этапа ЭИ

На рис. 12 представлены гистограммы изменения параметров ВУ. Светло-серые столбики гистограммы показывают значения фоновых показателей, проводившихся до начала работы в ВС. У этих столбиков красными метками обозначены границы ошибки $\pm 10\%$. Темные столбики гистограммы показывают значения параметров, полученные после работы в ВС. Изменения параметров в пределах 10 % считаются незначительными (в пределах погрешности прибора, а также вклада в эту ошибку внешних факторов – произвольных движений космонавта, накопленной усталости). Как видно из рис. 12 в тесте Ромберга у 4 из 5 космонавтов КФР менялся незначительно, в то время как другие три параметра в большинстве случаев претерпевали значительные изменения.

На рис. 13 представлены гистограммы четырех параметров для тестов с поворотом головы вправо. В левой колонке результаты пробы до и после первого сеанса управления РТС АТ, а во второй колонке – до и после второго.

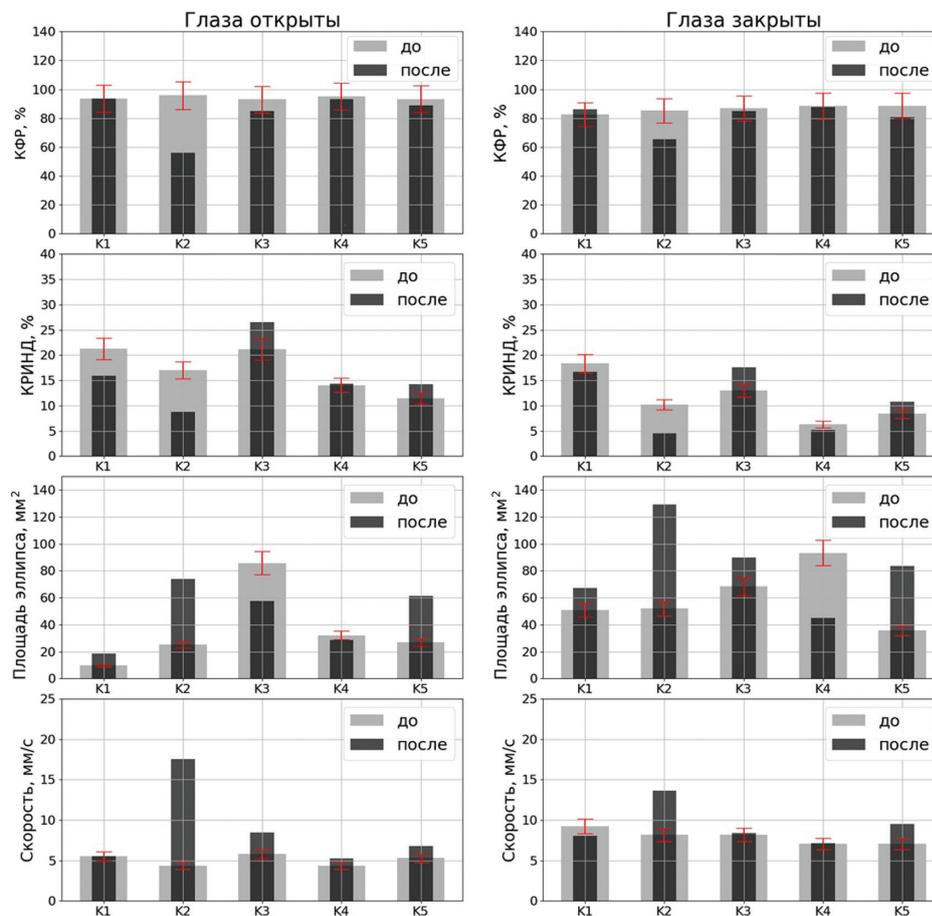


Рис. 12. Изменения показателей ВУ космонавтов в тесте Ромберга до и после выполнения управления РТС АТ в ВС

Аналогично, на рис. 14 и 15 представлены результаты параметров для тестов с поворотом головы вверх и прямо, соответственно.

На рис. 14 и 15 во второй серии тестов отсутствуют данные по космонавту К4 из-за технического сбоя аппаратуры.

В тестах с поворотами головы мы видим аналогичную с тестом Ромберга ситуацию: КФР меняется незначительно, в пределах 10 %, в то время как остальные параметры в большинстве случаев меняются более чем на 10 % от фонового измерения.

Подобная картина может говорить о том, что длительное нахождение в ВС не повлияло на качество поддержания вертикальной позы (КФР менялся незначительно). В то же время наблюдаются изменения других параметров, что свидетельствует об изменениях в стратегии поддержания устойчивой вертикальной позы.

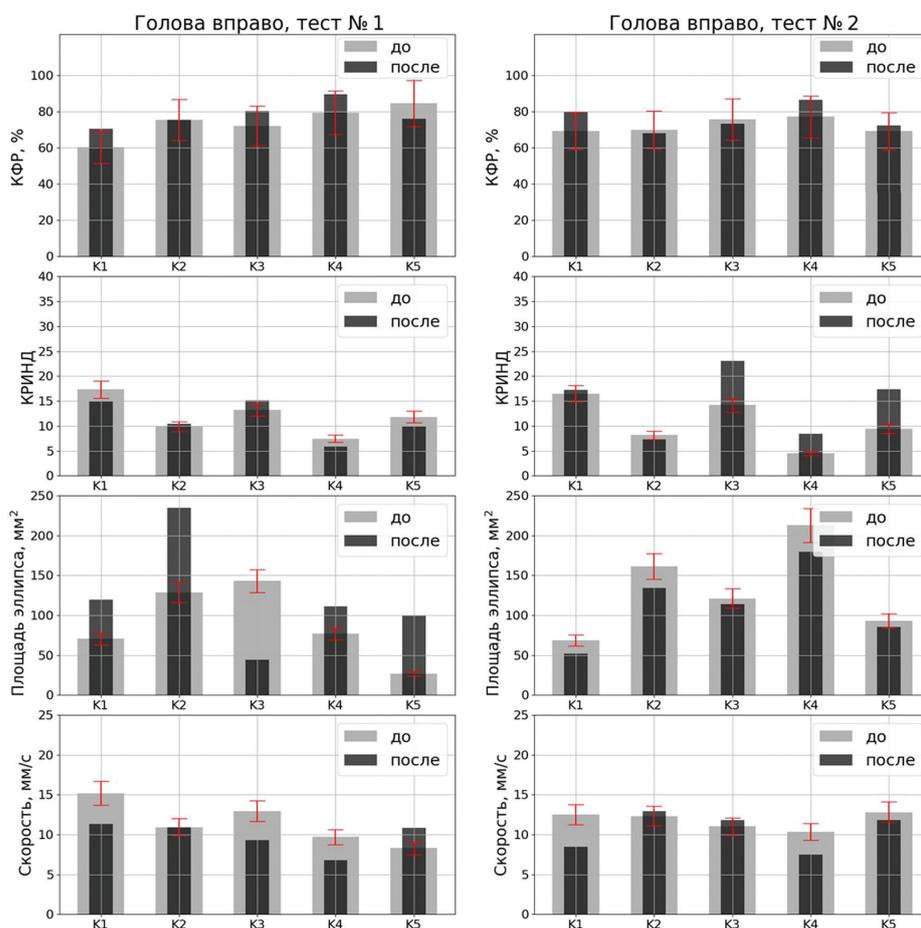


Рис. 13. Изменения показателей ВУ космонавтов в тесте с поворотами головы вправо до и после выполнения управления РТС АТ в ВС

Дополнительно, об изменении стратегии поддержания устойчивой вертикальной позы в пробе Ромберга после управления РТС АТ в ВС в тестах как с открытыми глазами (ОГ), так и с закрытыми глазами (ЗГ), свидетельствуют показатели амплитуды электромиограммы (ЭМГ) мышц голени.

В пробе Ромберга до начала управления РТС АТ в ВС амплитуда ЭМГ мышц голени изменялась следующим образом: выявлено, что наиболее значительное усилие при поддержании вертикальной позы развивали мышцы – сгибатели голени (камбаловидная и икроножная), их амплитуда ЭМГ в тесте ОГ достигала в среднем по группе (166 ± 13) мкВ и (139 ± 17) мкВ, соответственно. В разгибателях голени (передняя большеберцовая мышца) амплитуда ЭМГ в среднем по группе составляла (120 ± 18) мкВ. В тесте ЗГ амплитуда ЭМГ незначительно увеличивалась во всех изучаемых мышцах и в среднем по группе составляла в камбаловидной мышце (172 ± 12) мкВ,

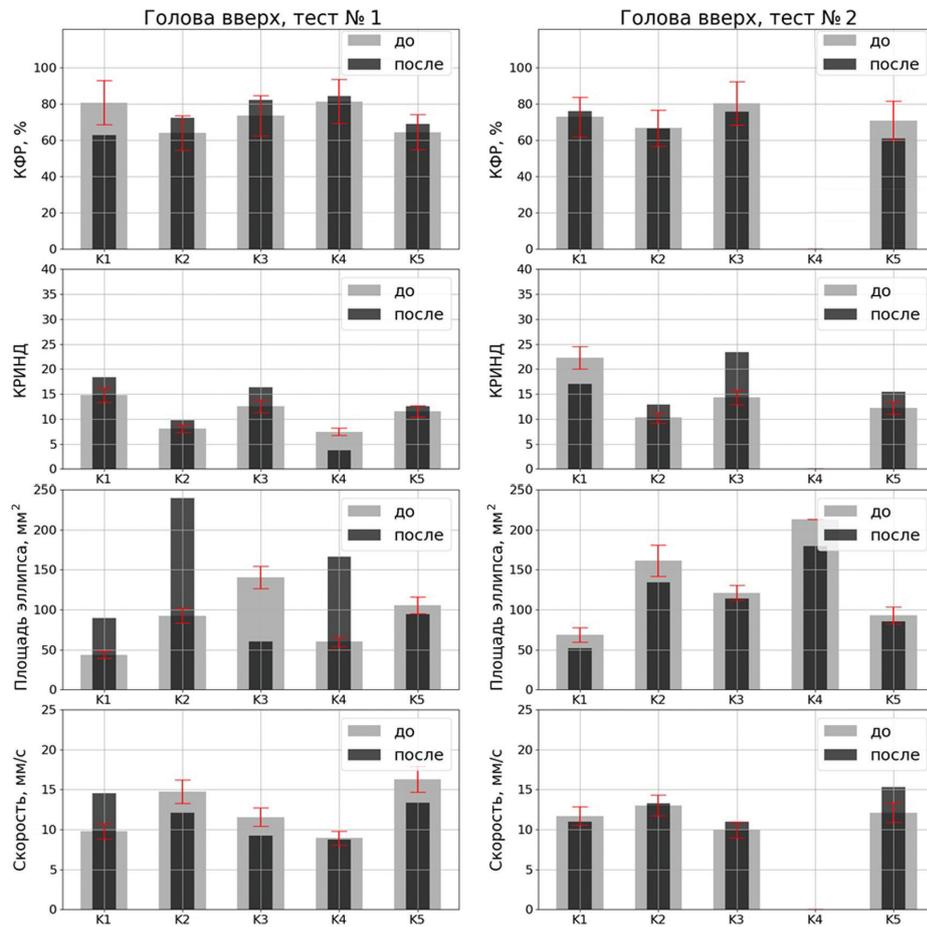


Рис. 14. Изменения показателей ВУ космонавтов в тесте с поворотами головы вверх до и после выполнения управления РТС АТ в ВС

в икроножной мышце (147 ± 11) мкВ, в передней большеберцовой мышце (128 ± 10) мкВ, то есть до ЭИ основная активность приходилась на сгибатели голени (заднюю поверхность голени).

После управления РТС АТ в ВС амплитуда ЭМГ мышц голени значительно увеличилась во всех изучаемых мышцах. В данном случае наибольшее усилие при поддержании вертикальной позы в тесте ОГ развивали разгибатели голени (передняя большеберцовая мышца), амплитуда ЭМГ в среднем по группе составляла (257 ± 28) мкВ (доверительный интервал $P = 0,007$), в сгибателях голени (икроножная и камбаловидная мышцы) выявлена меньшая активность: в икроножной мышце амплитуда ЭМГ в среднем по группе составляла (207 ± 11) мкВ ($P = 0,005$), в камбаловидной мышце (191 ± 28) мкВ ($P = 0,005$) (см. рис. 16), где @ – различия достоверны с фоном при $P \leq 0,05$.

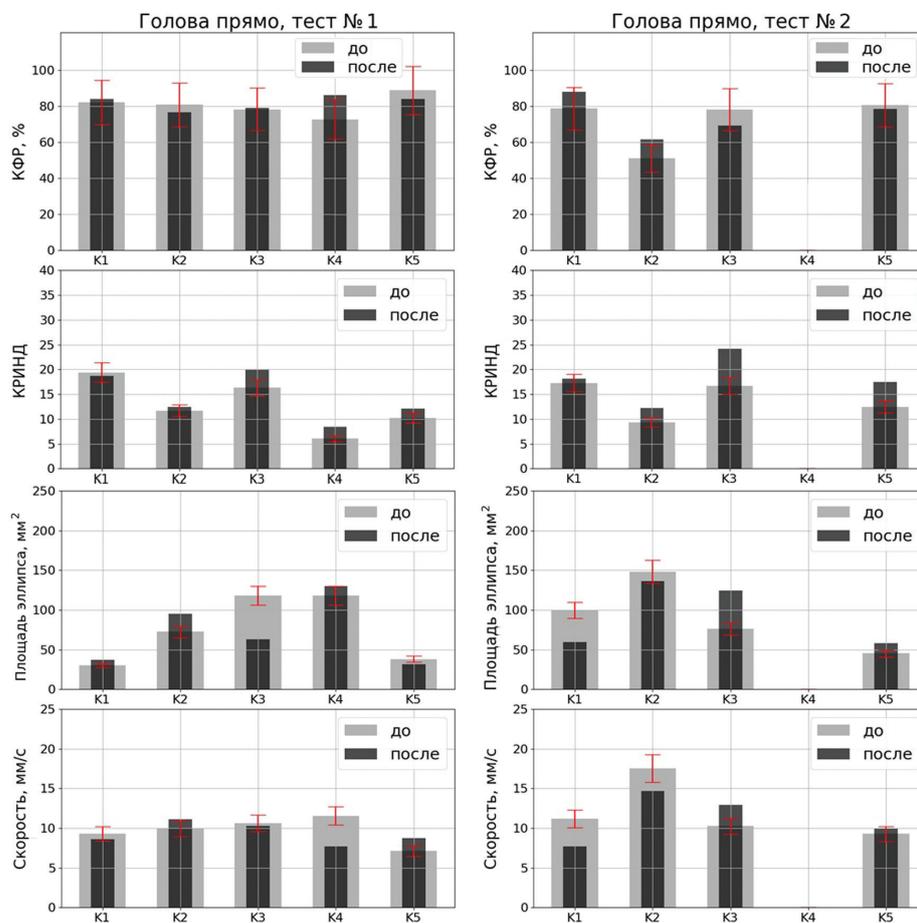


Рис. 15. Изменения показателей ВУ космонавтов в тесте с поворотами прямо вправо до и после выполнения управления РТС АТ в ВС

Аналогичные статистически значимые по сравнению с фоном изменения выявлены и в тесте ЗГ. В тесте ЗГ наибольшее усилие при поддержании вертикальной позы в ВС после ЭИ отмечалось в разгибателях (передняя большеберцовая мышца) голени, амплитуда ЭМГ в среднем по группе составляла (270 ± 8) мкВ. В сгибателях голени в икроножной мышце амплитуда ЭМГ в среднем по группе составляла (222 ± 8) мкВ ($P = 0,005$), в камбаловидной мышце (218 ± 13) мкВ ($P = 0,005$) (см. рис. 17).

Кроме того, значимое увеличение электромиографической активности отмечено между результатами в тестах ОГ и ЗГ после выполнения задач в ВС (см. рис. 18). Достоверно значимо больше амплитуда ЭМГ в тесте ЗГ в сгибателях голени ($P = 0,05$). В разгибателях голени увеличение показателя незначительны.

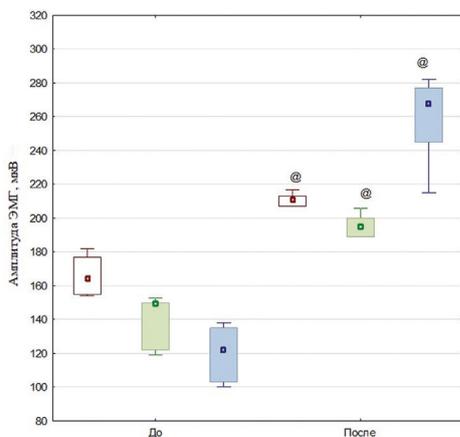


Рис. 16. Амплитуда ЭМГ мышц голени космонавтов до и после ЭИ в ВС в пробе Ромберга в тесте ОГ

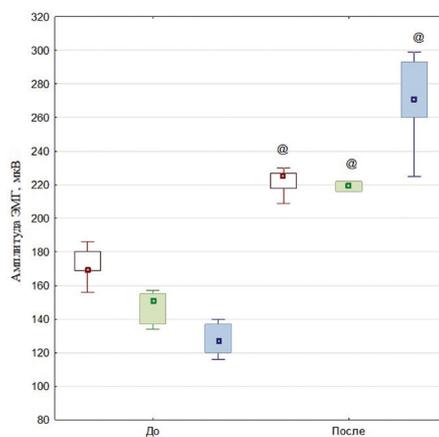


Рис. 17. Амплитуда ЭМГ мышц голени космонавтов до и после ЭИ в ВС в пробе Ромберга в тесте ЗГ

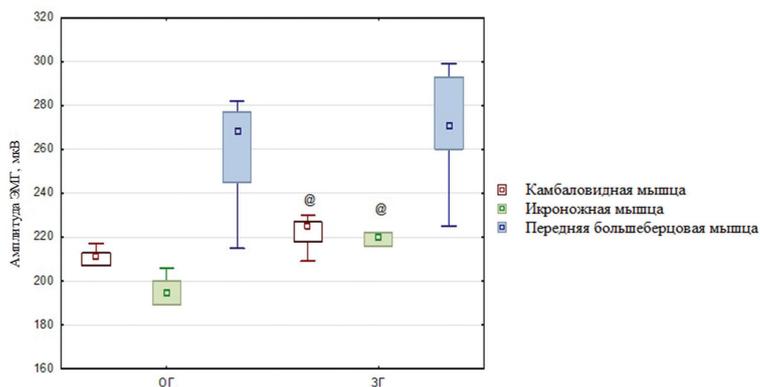


Рис. 18. Амплитуда ЭМГ мышц голени космонавтов после ЭИ в ВС в пробе Ромберга в тестах ОГ и ЗГ

Полученные результаты могут свидетельствовать о подключении для большей устойчивости дополнительных двигательных единиц в мышцах голени в результате общего утомления космонавта в процессе работы с отягощением, выполняемой длительное время в статическом положении.

После окончания ЭИ на УКС РТС космонавты жалоб на состояние здоровья не предъявляли, общее состояние было удовлетворительным. Значительных изменений во внешнем виде, травм и повреждений у космонавтов не выявлено. Объективные физиологические показатели (АД, ЧСС, температура тела) незначительно отличались от таковых, полученных перед исследованием на УКС РТС.

Выводы

На основании обработки результатов проведения ЭИ получены следующие выводы:

1. Выполнение космонавтами исследований не оказало отрицательного влияния на сердечно-сосудистую систему организма. Показатели ЧСС были характерными для реакции организма на условия выполняемой работы.

2. При выполнении циклограммы данного исследования возможно появление утомления, чувства напряжения в глазах, а также незначительного головокружения и головной боли. Данные изменения в самочувствии космонавтов, возможно, связаны с длительным периодом использования ШВР и нахождения в вертикальном положении.

3. Все отклонения в состоянии космонавтов носили преходящий характер, что не привело к негативным последствиям для их здоровья.

4. Физиологическая переносимость проведенных ЭИ оценена как хорошая.

5. Воздействие оптокинетического раздражителя на космонавтов при управлении РТС АТ в ВС не вызвало более выраженных изменений в функциональном состоянии по сравнению с воздействием пробы НКУК, проводимой в рамках динамического медицинского контроля с целью определения ВУ космонавтов.

6. Наибольшая интенсивность нагрузки и наибольшая физиологическая стоимость работы зафиксированы при выполнении космонавтами задач управления РТС АТ в ВС за счет одновременного сочетания оптокинетической и физической нагрузок, которые создаются работой с одновременным применением ШВР и ЗУКТ.

7. Изменения стабиллографических показателей и амплитуды ЭМГ мышц голени космонавтов после управления РТС АТ в ВС свидетельствуют об изменениях в стратегиях поддержания вертикальной позы.

В процессе выполнения первого и второго этапов ЭИ уточнены программы и методики их проведения.

ЭИ показали, что космонавты испытывают различный вестибулярный дискомфорт, разное снижение общей работоспособности при управлении РТС АТ в ВС. Полученные результаты могут стать основой для формирования программы и методики проведения профессионального и пролонгированного отбора кандидатов в космонавты и космонавтов в составе экипажей, тестирования индивидуального и коллаборативного выполнения ими операций по управлению РТС АТ в ВС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исследование возможностей использования робототехнических систем для поддержания операторской деятельности экипажей и формирования экосистемы / микроклимата сотрудничества / В.А. Дикарев, В.И. Дубинин, А.Н. Симбаев [и др.] // Пилотируемые полеты в космос. – 2023. – № 2(47). – С. 15–31.

- [2] Предпосылки и результаты модернизации универсального компьютерного стенда робототехнических систем / В.А. Дикарев, В.А. Довженко, Э.В. Никитов, Ю.С. Чеботарев // Пилотируемые полеты в космос. – 2021. – № 4(41). – С. 36–47.
- [3] Vection and Simulator Sickness / L.J. Hettinger, K.S. Berbaum, R.S. Kennedy [et al.] // *Military Psychology*. – 1990. – No 3(2). – P. 171–181.
- [4] Опыт применения виртуальной реальности для психологической коррекции в экспериментах с моделированием стрессоров космического полета / И.А. Розанов, А.В. Иванов, О.О. Рюмин, Ю.А. Бубеев; под ред. В.В. Козлова [и др.] // *Методология современной психологии*. – Москва: ЛКИИСИ РАН; Ярославль: ЯрГУ, МАПН, 2022. – № 16. – С. 329–340.
- [5] Диагностика устойчивости вестибулярной функции спортсменов с применением технологии виртуальной реальности. – URL: <http://sportfiction.ru/articles/diagnostika-ustoychivosti-vestibulyarnoy-funktsii-sportsmenov-s-primeneniem-tekhnologii-virtualnoy-r/> (дата обращения 27.07.2023).

REFERENCES

- [1] Investigation of Robotic Systems Possibilities to Support Crew Operator Activity and Formation of Cooperation Ecosystem / Microclimate / V.A. Dikarev, V.I. Dubinin, A.N. Simbaev [et al.] // *Manned Spaceflight*. – 2023. – No 2(47). – P. 15–31.
- [2] Motivation and Results of Modernization of Multipurpose Computer-Aided Simulator of Robotic System / V.A. Dikarev, V.A. Dovzhenko, E.V. Nikitov, Yu.S. Chebotarev // *Manned Spaceflight*. – 2021. – No 4(41). – P. 36–47.
- [3] Vection and Simulator Sickness / L.J. Hettinger, K.S. Berbaum, R.S. Kennedy [et al.] // *Military Psychology*. – 1990. – No 3(2). – P. 171–181.
- [4] The experience of Using Virtual Reality for Psychological Correction in Experiments with Modeling Space Flight Stressors / I.A. Rozanov, A.V. Ivanov, O.O. Ryumin, Yu.A. Bubeev; edited by V.V. Kozlov, [et al.] // *Methodology of modern Psychology*. – Moscow: LKIISI RAS; Yaroslavl: YarSU, MAPN, 2022. – No 16. – P. 329–340.
- [5] Diagnosis of the Vestibular Function Stability of Athletes Using Virtual Reality Technology. – URL: <http://sportfiction.ru/articles/diagnostika-ustoychivosti-vestibulyarnoy-funktsii-sportsmenov-s-primeneniem-tekhnologii-virtualnoy-r/> (date of access 27.07.2023).