

**Elena V. FOMINA,**

*Doctor of Biological Sciences, Professor, head of hypogravitational disturbances countermeasures laboratory, State Research Center – IMBP RAS, Moscow, Russia, fomin-fomin@yandex.ru*



**Елена Валентиновна ФОМИНА,**

*доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией профилактики гипогравитационных нарушений ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, Россия, fomin-fomin@yandex.ru*

**Natalya A. SENATOROVA,**

*postgraduate student, research assistant, hypogravitational disturbances countermeasures laboratory, State Research Center – IMBP RAS, Moscow, Russia, natasha\_mamrukova@mail.ru*



**Наталья Андреевна СЕНАТОРОВА,**

*аспирант, младший научный сотрудник лаборатории профилактики гипогравитационных нарушений ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, natasha\_mamrukova@mail.ru*

**Viktoriya V. Kirichenko,**

*postgraduate student, surgeon, research assistant, hypogravitational disturbances countermeasures laboratory, State Research Center – IMBP RAS, Moscow, Russia, victoria.kirichenko@me.com*



**Виктория Владимировна КИРИЧЕНКО,**

*аспирант, врач-хирург, младший научный сотрудник лаборатории профилактики гипогравитационных нарушений ГНЦ РФ – ИМБП РАН, Москва, Россия, victoria.kirichenko@me.com*

**Ivan V. VAGNER,**

*test cosmonaut, State Organization “Gagarin Research & Test Cosmonaut Training Center”, Russia, Star City*



**Иван Викторович ВАГНЕР,**

*космонавт-испытатель, ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю. А. Гагарина», Россия, Звездный городок*

**ABSTRACT |** The paper contains modern understanding of gravity-dependent changes in human body systems that occur during space flight and of modern problems, the solution of which will bring humanity closer to ensuring medical safety in interplanetary missions. Particular consideration is given to the state of the systems limiting physical performance, which is a factor that largely determines the success of planetary activities in ultra-long-range space flights. Hypogravitational disturbances countermeasures used on the ISS are described, with emphasis on some features that are specific to the ISS partners. Prospects for development of countermeasures for hypogravitational disorders in interplanetary missions are considered.

**Keywords:** *aerospace medicine, hypogravitational disturbances, interplanetary missions, countermeasures*

**АННОТАЦИЯ |** Статья содержит современные представления о гравизависимых изменениях в физиологических системах человека, происходящих во время космического полета. Описаны современные проблемы, решение которых приблизит человечество к обеспечению медицинской безопасности в межпланетной миссии. Особое внимание уделено состоянию систем, лимитирующих физическую работоспособность, – фактора, во многом определяющего успешность напланетной деятельности в сверхдальних космических полетах. Описаны методы профилактики гипогравитационных нарушений, используемые на МКС, с акцентом на некоторые особенности, характерные для партнеров по станции. Рассмотрены перспективы разработки методов профилактики гипогравитационных нарушений в межпланетных полетах.

**Ключевые слова:** *космическая медицина, гипогравитационные нарушения, межпланетные миссии, профилактика*

# ISS — A PLATFORM FOR DEVELOPING A SYSTEM FOR HYPOGRAVITATIONAL DISTURBANCES COUNTERMEASURES IN INTERPLANETARY MISSIONS

# МКС — ПЛАТФОРМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ПРОФИЛАКТИКИ ГИПОГРАВИТАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ В МЕЖПЛАНЕТНЫХ МИССИЯХ

Человечество приближается к осуществлению мечты — освоению дальнего космоса. Как в прошлом веке наземные эксперименты явились важнейшим этапом, предваряющим полет Юрия Гагарина, так и орбитальные полеты стали неотъемлемой частью подготовки человека к межпланетным миссиям. Серия годовых полетов на орбитальную станцию «Мир» космонавтов Ю. В. Романенко (326 суток), В. Г. Титова (365 суток), М. Х. Манарова (365 суток), С. К. Крикалёва (311 суток), С. В. Авдеева (379 суток) с достижением рекордной продолжительности полета в 438 суток В. В. Полякова показала, что человек может безопасно находиться в условиях невесомости на протяжении периода времени, сопоставимого с полетом к Марсу. Один годовой полет международного экипажа Михаила Корниенко и Скотта Келли выполнен и на МКС, что служит подготовке к совершению межпланетных миссий на основе новых технологий и достижений фундаментальной науки. Научное сообщество продолжает изучать механизмы действия и пути предотвращения негативных влияний основных факторов межпланетного полета, таких как радиационное воздействие, невесомость, искусственная среда обитания, изоляция и удаленность от Земли. В настоящее время особый интерес ученых представляет фактор полета, который длительное время оставался в тени, — гипомагнитная среда.

**Серия годовых полетов космонавтов на орбитальную станцию «Мир» показала, что человек может безопасно находиться в условиях невесомости на протяжении периода времени, сопоставимого с полетом к Марсу.**

В первую очередь рассмотрим, как эксплуатация МКС позволила расширить знания о синдромах, сопровождающих пребывание в невесомости, которые были приобретены при реализации космических программ «Салют», Skylab, Apollo, Mercury, «Мир», Gemini, Space Shuttle. Далее остановимся на синдроме, впервые описанном только во время эксплуатации МКС.

## ИЗМЕНЕНИЯ В ГРАВИЗАВИСИМЫХ СИСТЕМАХ

С первых часов пребывания человека в невесомости начинаются изменения в работе физиологических систем. Перестройки афферентного синтеза обусловлены, в первую очередь, возникновением новой конфигурации взаимодействия сенсорных систем. Значительные возмущения в сенсорный приток вносит информация от вестибулярной системы, по мере адаптации к условиям невесомости центральная нервная система отключает анализ сигналов с этого сенсорного входа. Поток информации от проприорецепторов мышц сигнализирует об отсутствии растяжения под действием силы тяжести, а рецепторные зоны стоп — об отсутствии опоры. Как следствие, происходит перераспределение мышечного тонуса — снижается тонус мышц-разгибателей, обеспечивающих поддержание позы в условиях Земли, и усиливается тонус мышц-сгибателей.

Еще одним проявлением пребывания в невесомости на начальном этапе полета является перераспределение крови в краниальном направлении, что изменяет работу сердечно-сосудистой системы. Сердечный выброс увеличивается на фоне неизменного венозного давления или при его небольшом снижении [1]. Происходит перемещение жидкости из внутри- во внесосудистое пространство, наблюдается уменьшение объема плазмы в результате усиления диуреза. В условиях невесомости происходит снижение вентиляционно-перфузионного отношения вследствие гиперволемии легких и исчезновения градиента гидростатического давления между основанием и верхушками легких [2]. Все это запускает перестройки функциональных систем с формированием новых взаимодействий, обеспечивающих механизмы жизнедеятельности и поддержания гомеостаза в условиях невесомости.

Длительное пребывание в условиях невесомости приводит к адаптивным изменениям в гравизависимых системах, нервно-мышечная система является одной из таковых. Снижение интенсивности сенсорного притока от рецепторов опоры рассматривается как пусковой механизм в развитии гипогравитационного двигательного синдрома [3], характеризующегося атонией, атрофией, снижением выносливости и силовых способностей мышц. Снижение скорости синтеза мышечного белка, по-видимому, является основным механиз-

мом, лежащим в основе мышечной атрофии, вызванной разгрузкой в длительных космических полетах, и при этом преимущественно страдают мышечные волокна с аэробным механизмом энергообеспечения, то есть использующие кислород для восстановления АТФ [4].

Ранее предполагалось, что долговременная адаптация к условиям невесомости характеризуется нормализацией показателей ударного объема сердца и минутного объема кровообращения, однако в результате 24-часового мониторинга показателей сердечно-сосудистой системы астронавтов МКС на различных этапах полета было обнаружено, что эти показатели остаются значительно повышенными на фоне сниженного систолического и диастолического давления [5]. Снижение артериального давления вызвано расширени-

ем сосудов. Физиологические механизмы этого явления продолжают изучаться. В системе крови наблюдается синдром функциональной эритроцитопении, что усугубляет снижение кислородно-транспортных функций крови и ортостатической устойчивости.

Все описанные выше изменения ведут к снижению максимального потребления кислорода (МПК), интегрального показателя, характеризующего аэробную физическую работоспособность. В длительных полетах на МКС зарегистрировано снижение МПК на 17 % в течение первых двух недель, далее наблюдалась тенденция к увеличению этого показателя, но он не возвращался к предполетному уровню на протяжении миссии, а в течение 48 часов после полета был снижен на 15 % [6]. В тестах на выполнение субмаксимальной физической нагрузки в длительном



**Рис. 1.** Иван Вагнер выполняет тренировку на дорожке БД-2 во время экспедиции на МКС

полете аэробная работоспособность снижалась в начале полета, приближалась к предполетному уровню на заключительном этапе полугодового полета и оказалась значительно снижена при тестировании через три-пять дней после приземления [7].

Изучение механизмов снижения физической работоспособности в условиях невесомости чрезвычайно важно при подготовке к межпланетным полетам. Очевиден вклад всех описанных выше изменений, таких как уменьшение объема плазмы [1], снижение числа эритроцитов, потеря мышечной массы, способной утилизировать кислород, детренированность сердца [5], изменения в системе управления движениями. Важно определить пороги снижения функций, после достижения которых успешность выполнения задач миссии может оказаться под угрозой, необходимо определить и динамику восстановления функций для правильного планирования сценариев предстоящих миссий.

Наряду с перестройками в нервно-мышечной системе, длительное пребывание в невесомости ведет к нарушению минерального обмена костной ткани. Показан градиент изменений в костной системе, проявляющийся в снижении минеральной плотности костной ткани в трабекулярных структурах нижней половины скелета и увеличении плотности в костях верхней половины скелета. Средняя скорость потери костной массы составляет около 1,5 % за месяц космического полета. Изменения обмена кальция проявляются в повышении его уровня в моче, в то время как всасывание кальция в кишечнике несколько снижается, а общий кальций в плазме крови увеличивается. Потери минеральной плотности кости часто продолжа-

ются в течение месяцев после возвращения человека на Землю. Это важно учитывать не только при планировании орбитальных полетов, но также предполагая предстоящую напланетную деятельность в эксплораторных полетах, так как увеличивается риск переломов и возникновения камней в почках. Наши партнеры по МКС уделяют особое внимание потерям костной ткани [8], российские ученые находят приоритетным предотвращение снижения потерь мышечной ткани, так как все послеполетные изменения в костной ткани после полугодового полета находятся в пределах физиологической нормы, в то время как сила мышц ног может снижаться на четверть [9].

Как уже упоминалось, за годы эксплуатации МКС был описан еще один синдром, представляющий опасность для здоровья человека в космических полетах: это так называемый нейроокулярный синдром [10–12]. Первоначально описанное явление было обозначено как VIIP (Visual impairment intracranial pressure), позднее стал использоваться термин SANS (Space flight-associated neuro-ocular syndrome). Этиология этого явления в настоящий момент неясна. Предложено несколько гипотез возникновения нейроокулярного синдрома в космическом полете: повышение внутричерепного давления в результате перераспределения жидкости в условиях невесомости, увеличение застоя крови в церебральных венах, повышение давления в оболочке зрительного нерва. Как следствие, возникают отек зрительного диска, уплощение глазного яблока, складки хориоидеи и сетчатки, гиперметропическая рефракция, очаговые области ишемии сетчатки [10]. В настоящее время риск возникновения нейроокулярного синдрома в космическом полете чрезвычайно активно изучается нейрофизиологами и офтальмологами, выполняются модельные и космические эксперименты.

### СИСТЕМА ПРОФИЛАКТИКИ

С целью предотвращения негативных перестроек, сопровождающих длительное пребывание в условиях невесомости, была разработана система профилактики гипогравитационных нарушений, которая была усовершенствована за время эксплуатации МКС. В эпоху орбитальных полетов эта система, в первую очередь, была призвана подготовить человека к возвращению в условия земной гравитации, а если говорить о межпланетных полетах, то такая система должна обеспечить подготовку чело-

**В настоящее время описаны параметры локомоторных тренировок, обеспечивающих наибольший профилактический эффект, а индивидуальные особенности опорных реакций рассматриваются в качестве одного из возможных показателей для персонализации тренировочного процесса.**



**Рис. 2.** Иван Вагнер выполняет тренировку на велэргометре ВВ-3М во время экспедиции на МКС

века к выполнению задач в условиях парциальной гравитации.

Российская система профилактики включает использование упражнений на беговой дорожке, велоэргометре и силовом тренажере. Это основные средства, кроме них в качестве дополнительных или альтернативных используются костюм для нагружения постуральных мышц («Пингвин»), низкочастотный и высокочастотный электромиостимуляторы, компрессионные набедренные манжеты, уменьшающие интенсивность перераспределения крови в головной отдел («Браслет»), костюм отрицательного давления на нижнюю часть тела («Чибис»), компрессионный костюм на нижнюю часть тела для перераспределения крови во время перегрузок на этапе спуска («Кентавр»), а также водно-солевые добавки [13].

Ключевым элементом в российской системе профилактики являются тренировки на беговой дорожке. Выполнение естественных для человека локомоций в интервальном режиме с чередованием отрезков бега с высокой скоростью с отрезками ходьбы вовлекает в работу постуральные мышцы, которые наиболее подвержены негативным влияниям невесомости, обеспечивает интенсивный сенсорный приток от рецепторов опоры, противодействует изменениям в костной системе, повышает уровень функционирования висцеральных систем и противодействует негативным изменениям в системе крови (рис. 1, 2). В настоящее время описаны параметры локомоторных тренировок, обеспечивающих наибольший профилактический эффект, а индивидуальные особенности опорных реакций рассматриваются в качестве

одного из возможных показателей для персонализации тренировочного процесса [13].

Упражнения на велоэргометре ВБ-3 выполняются через день, но, к сожалению, в настоящий момент регистрация параметров тренировки не производится. В ближайшем время велоэргометр будет снабжен пультом с программным обеспечением, позволяющим регистрировать и далее передавать на Землю данные о тренировке.

Американский силовой тренажер ARED обеспечивает нагрузку до 273 кг, имитируя упражнения со свободными весами [14]. Возможность использования тренажера российскими космонавтами предоставляется с 2009 года. Партнеры по МКС рекомендуют использовать ежедневные силовые тренировки с нагрузением, превосходящим вес тела человека до полета в два раза и более [14]. Исследования российской стороны указывают на достаточную эффективность в сохранении и восстановлении скоростно-силовых качеств мышц тренировок с весом, близким к весу тела человека до полета, выполняемых через день. Осторожность в увеличении весового нагружения обусловлена возможностью вклада чрезмерных нагрузок в развитие SANS. Экспериментально доказано повышение внутриглазного давления и застойные явления в области глазного дна при выполнении силовых упражнений на Земле [15]. Несмотря на некоторые различия, за годы эксплуатации МКС российская система профилактики и системы наших партнеров приобретают все больше общих черт.

Большинство космонавтов используют на заключительном этапе полета костюм отрицательного давления на нижнюю часть тела «Чибис-М». Костюм позволяет ниве-

**При возникновении внештатной ситуации в межпланетном полете поддержка наземных служб невозможна. Необходимо включение в состав экипажа врачей для проведения медицинского контроля и дальнейшего изучения механизмов действия факторов длительных космических полетов.**

лировать негативные эффекты, связанные с перемещением крови в краниальном направлении, поддерживать ортостатическую устойчивость. В совместном российско-американском эксперименте была предпринята попытка использования костюма «Чибис-М» для предотвращения развития SANS, однако результаты не показали достаточной эффективности средства для этих целей. Остальные пассивные средства профилактики, такие как «Браслет-М», костюм «Пингвин», электромиостимуляторы, используются космонавтами МКС довольно редко. Возможно, они окажутся более востребованы в межпланетных полетах, когда не будет необходимости постоянно поддерживать высокий уровень физической работоспособности, как это принято в орбитальных полетах.

### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важна разработка системы медицинского обеспечения долговременных лунных баз и освоения дальнего космоса. Поддержка наземных служб и возможность возвращения экипажа при возникновении внештатной ситуации в межпланетном полете невозможна, соответственно, система должна функционировать автономно при поддержке мощного информационного комплекса [16]. Перспективно включение в состав экипажа врачей для проведения медицинского контроля и дальнейшего изучения механизмов действия факторов длительных космических полетов [17].

Развитие российской системы профилактики гипогравитационных нарушений в интересах межпланетных полетов, в первую очередь, предполагает разработку системы поддержки принятия решения в сопровождении тренировочного процесса. В настоящее время разрабатывается прототип математической модели, описывающей изменение уровня физической работоспособности человека в условиях невесомости для прогнозирования уровня физической работоспособности. Космический эксперимент «Виртуальный тренер» предполагает регламентированное изменение параметров физических тренировок во время космического полета для математической оценки вклада каждого параметра.

Ведется поиск наиболее информативных показателей для развития персонализированного подхода в реализации тренировочного процесса. Возможность использования аэробно-анаэробного перехода при выполнении



**Рис. 3.** Предполетный локомоторный тест космонавта Сергея Волкова с регистрацией параметров газообмена

локомоторного теста со ступенчато-возрастающей нагрузкой проверяется на МКС в эксперименте «Профилактика-2». В настоящее время космонавтам отправляются индивидуальные протоколы локомоторных тренировок на основе особенностей реакции сердечно-сосудистой системы на ступенчато-возрастающую локомоторную нагрузку (рис. 3).

В эксперименте «Стандарты здоровья» планируется определение параметров физических тренировок в полете, обеспечивающих успешное выполнение двигательных задач и моделирующих напланетную деятельность в начальном периоде реадaptации к условиям Земли, а также определение уровня здоровья космонавта на основе психофизиологических, биохимических, иммунологических и микробиологических показателей.

Таким образом, фундаментальные знания и технологии, появившиеся в период эксплуатации МКС, создают серьезный задел для межпланетных полетов. Планируя космические эксперименты, необходимо рассматривать каждый орбитальный полет как важный шаг, приближающий человечество к исполнению мечты.

*Поддержано базовым финансированием РАН б3.1*

**Литература**

1. **Shen M., Frishman W.** Effects of Spaceflight on Cardiovascular Physiology and Health. *Cardiology in review*, 2019, No. 27(3). Pp. 122 – 126. DOI: 10.1097/CRD.0000000000000236

2. **Баранов В.М.** Дыхание и невесомость // Итоги и перспективы исследований по актуальным проблемам космической биологии, авиационной и космической медицины в России: акты речи ведущих ученых ГНЦ РФ – ИМБП РАН, 2000–2017 гг. / под ред. А.И. Григорьева, О.И. Орлова. М.: ГНЦ РФ – ИМБП РАН. 2018. С. 145 – 169.

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

4. **Fitts R.H., Colloton P.A., Trappe S.W., Costill D.L., Bain J.L., Riley D.A.** Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985). 2013. Vol. 115. Iss. 5. Pp. 667 – 679. DOI:10.1152/jappphysiol.00489.2013

5. **Norsk P, Asmar A, Damgaard M, Christensen N.** Fluid shifts, vasodilatation and ambulatory blood pressure reduction during long duration spaceflight. *The Journal of physiology*. 2015. Vol. 593. Iss. 3. Pp.573 – 584. DOI:10.1113/jphysiol.2014.284869

6. **Moore A., Downs M., Lee S., Feiveson A., Knudsen P., Ploutz-Snyder L.** Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight // *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md. : 1985).2014.

Vol. 117. Iss. 3. Pp. 231 – 238. DOI: 10.1152/jappphysiol.01251.2013

7. **Petersen N., Jaekel P., Rosenberger A., Weber T., Scott J.** Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. *Extreme physiology & medicine*. 2016. Vol. 5. Iss. 9. Pp. 1 – 13. DOI: 10.1186/s13728-016-0050-4

8. **Smith S., Heer M., Shackelford L., Sibonga J., Ploutz-Snyder L.** Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: Evidence from biochemistry and densitometry // *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*. 2012. No. 27(9). Pp. 1896 – 1906. DOI: 10.1002/jbmr.1647

9. **Кукоба Т.Б., Новиков В.Е., Бабич Д.Р., Лысова Н.Ю., Гордиенко К.В., Фомина Е.В.** Профилактическая эффективность резистивных упражнений для костной системы космонавтов в многократных длительных космических полетах // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2018. Т. 52. № 5. С. 28 – 33.

10. **Mader T., Gibson C., Pass A.** Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight // *Ophthalmology*. 2011. Vol. 118. No. 10. Pp. 2058 – 2069. DOI: 10.1016/j.ophtha.2011.06.021

11. **Богомолов В.В., Кузьмин М.П., Даниличев С.Н.** К вопросу о внутричерепной гипертензии у астронавтов в условиях длительной невесомости // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2015. Т. 49. № 4. С. 54 – 58.

12. **Lee A., Mader T., Gibson C., Brunstetter T., Tarver W.** Space flight-associated neuro-ocular syndrome (SANS). *Eye* (London, England). 2018. Vol. 32. Iss. 7. Pp. 1164 – 1167. DOI:10.1038/s41433-018-0070-y

13. **Kozlovskaya I., Yarmanova E., Yegorov A., Stepanov V., Fomina E.** Russian countermeasure systems for adverse effects of microgravity on long-duration ISS flights // *Aerospace medicine and human performance*. 2015. Vol. 86. No. 12. Pp. 24 – 31.

14. **English K., Lee S., Loehr J., Ploutz-Snyder L.** Isokinetic Strength Changes Following Long-Duration Spaceflight on the ISS // *Aerospace medicine and human performance*. 2015. Vol. 86. No. 12. Pp. 68 – 77.

15. **Макаров И.А., Воронков Ю.И.** Влияние физических нагрузок в положении лежа на внутриглазное давление // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2017. Т. 51. № 2. С. 47 – 51.

16. **Плетнер К.В.** Олег Орлов: медицина на службе космической мечты // *Воздушно-космическая сфера*. 2020. № 2. С. 16 – 25.

17. **Орлов О.И., Котов О.В., Куссмауль А.Р., Белаковский М.С.** Роль врача в дальнем космическом полете // *Воздушно-космическая сфера*. 2020. № 1. С. 36 – 49.

**References**

1. **Shen M., Frishman W.** Effects of Spaceflight on Cardiovascular Physiology and Health. *Cardiology in review*, 2019, no. 27(3), pp. 122 – 126. DOI: 10.1097/CRD.0000000000000236

2. **Baranov V.M.** Dykhanie i nevesomost'. Itogi i perspektivy issledovaniy po aktual'nym problemam kosmicheskoy biologii, aviatsionnoy i kosmicheskoy meditsiny v Rossii: aktovy rechi vedushchikh uchenykh GNTs RF – IMBP RAN, 2000–2017 gg. Eds. A.I. Grigor'ev, O.I. Orlov. Moscow, GNTs RF – IMBP RAN, 2018, pp. 145 – 169.

3. **Kozlovskaya I.B.** Gravitatsiya i pozno-tonicheskaya dvigatel'naya sistema. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 5 – 21.

4. **Fitts, R.H., Colloton, P.A., Trappe, S.W., Costill, D.L., Bain, J.L., Riley, D.A.** Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 2013, vol. 115, iss. 5, pp. 667 – 679. DOI:10.1152/jappphysiol.00489.2013

5. **Norsk P., Asmar A., Damgaard M., Christensen N.** Fluid shifts, vasodilatation and ambulatory blood pressure reduction during long duration spaceflight. *The Journal of physiology*, 2015, vol. 593, iss. 3, pp.573 – 584. DOI:10.1113/jphysiol.2014.284869

6. **Moore A., Downs M., Lee S., Feiveson A., Knudsen P., Ploutz-Snyder L.** Peak exercise oxygen uptake during and following long-duration spaceflight. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md.: 1985), 2014,

vol. 117, iss. 3, pp. 231 – 238. DOI: 10.1152/jappphysiol.01251.2013

7. **Petersen N., Jaekel P., Rosenberger A., Weber T., Scott J.** Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. *Extreme physiology & medicine*. 2016, vol. 5, iss. 9, pp. 1 – 13. DOI: 10.1186/s13728-016-0050-4

8. **Smith S., Heer M., Shackelford L., Sibonga J., Ploutz-Snyder L.** Benefits for bone from resistance exercise and nutrition in long-duration spaceflight: Evidence from biochemistry and densitometry. *Journal of bone and mineral research : the official journal of the American Society for Bone and Mineral Research*, 2012, no. 27(9), pp. 1896 – 1906. DOI: 10.1002/jbmr.1647

9. **Kukoba T.B., Novikov V.E., Babich D.R., Lysova N.Yu., Gordienko K.V., Fomina E.V.** Profilakticheskaya effektivnost' rezistivnykh uprazhneniy dlya kostnoy sistemy kosmonavtov v mnogokratnykh dlitel'nykh kosmicheskikh poletakh. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2018, vol. 52, no. 5, pp. 28 – 33.

10. **Mader T., Gibson C., Pass A.** Optic disc edema, globe flattening, choroidal folds, and hyperopic shifts observed in astronauts after long-duration space flight. *Ophthalmology*, 2011, vol. 118, no. 10, pp. 2058 – 2069. DOI: 10.1016/j.ophtha.2011.06.021

11. **Bogomolov V.V., Kuz'min M.P., Danilichev S.N.** K voprosu o vnutricherepnoy gipertenzii u astronavtov v usloviyakh dlitel'noy nevesomosti. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2015, vol. 49, no. 4, pp. 54 – 58.

12. **Lee A., Mader T., Gibson C., Brunstetter T., Tarver W.** Space flight-associated neuro-ocular syndrome (SANS). *Eye* (London, England). 2018, vol. 32, iss. 7., pp. 1164 – 1167. DOI:10.1038/s41433-018-0070-y

13. **Kozlovskaya I., Yarmanova E., Yegorov A., Stepanov V., Fomina E.** Russian countermeasure systems for adverse effects of microgravity on long-duration ISS flights. *Aerospace medicine and human performance*. 2015, vol. 86, no. 12, pp. 24 – 31.

14. **English K., Lee S., Loehr J., Ploutz-Snyder L.** Isokinetic Strength Changes Following Long-Duration Spaceflight on the ISS. *Aerospace medicine and human performance*, 2015, vol. 86, no. 12, pp. 68 – 77.

15. **Makarov I.A., Voronkov Yu.I.** Vliyaniye fizicheskikh nagruzok v polozhenii lezha na vnutriglaznoye davlenie. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*, 2017, vol. 51, no. 2, pp. 47 – 51.

16. **Pletner K.V.** Oleg Orlov: meditsina na sluzhbe kosmicheskoy mechty. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2020, no. 2, pp. 16 – 25.

17. **Orlov O.I., Kotov O.V., Kussmaul' A.R., Belakovskiy M.S.** Rol' vracha v dal'nem kosmicheskom polete. *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2020, no. 1, pp. 36 – 49.



© Фомина Е.В., Сенаторова Н.А., Кириченко В.В., Вагнер И.В., 2020

**История статьи:**

Поступила в редакцию: 19.09.2020

Принята к публикации: 11.10.2020

**Модератор:** Плетнер К.В.

**Конфликт интересов:** отсутствует

**Для цитирования:**

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. С. 10 – 19.