

# **АВИАКОСМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МЕДИЦИНА**

## **AVIAKOSMICHESKAYA I EKOLOGICHESKAYA MEDITSINA**

НАУЧНЫЙ ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
SCIENTIFIC PERIODIC JOURNAL

### **ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**

Орлов О.И., д.м.н., академик РАН

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Ардашев В.Н., д.м.н., профессор  
Баранов В.М., д.м.н., профессор, академик РАН  
Буравкова Л.Б., д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН  
Бухтияров И.В., д.м.н., профессор  
Виноградова О.Л., д.б.н., профессор  
Дьяченко А.И., д.т.н., профессор  
Ерофеева Л.М., д.б.н., профессор  
Иванов И.В., д.м.н., профессор  
Ильин Е.А., д.м.н., профессор – заместитель главного редактора  
Котов О.В., к.м.н.  
Красавин Е.А., к.м.н., д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН  
Меденков А.А., к.психол.н., д.м.н., профессор  
Синяк Ю.Е., к.х.н., д.т.н., профессор  
Сорокин О.Г., к.м.н.  
Суворов А.В., д.м.н., профессор  
Усов В.М., д.м.н., профессор  
Хоменко М.Н., д.м.н., профессор  
Mukai Ch., M.D., Ph.D. (Japan)  
Sutton J., M.D., Ph.D. (USA)  
Suchet L.G., Ph.D. (France)

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

Григорьев А.И., д.м.н., профессор, академик РАН – **председатель**  
Благинин А.А., д.м.н., д.психол.н., профессор  
Гальченко В.Ф., д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН  
Жданько И.М., д.м.н.  
Козловская И.Б., д.м.н., профессор, член-корреспондент РАН  
Котовская А.Р., д.м.н., профессор  
Никольский Е.Е., д.м.н., профессор, академик РАН  
Островский М.А., д.б.н., профессор, академик РАН  
Розанов А.Ю., д.г.-м.н., профессор, академик РАН  
Рубин А.Б., д.б.н., профессор, член-корреспондент РАН  
Залуцкий И.В., д.б.н., профессор, член-корреспондент НАНБ (Беларусь)  
Крышталь О.А., д.б.н., профессор, академик НАНУ (Украина)  
Макашев Е.К., д.б.н., профессор, член-корреспондент АН РК (Казахстан)  
Gerzer R., M.D., Ph.D., professor (Germany)  
Gharib C., Ph.D., professor (France)  
Yinghui Li, M.D., Ph.D., professor (China)

**2018 Т. 52 № 2**

## **ЖУРНАЛ ОСНОВАН В 1967 ГОДУ**

С 1967 по 1974 г. назывался «Космическая биология и медицина»,  
с 1974 по 1991 г. – «Космическая биология и авиакосмическая медицина»,  
с 1991 г. по настоящее время – «Авиакосмическая и экологическая медицина»

ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ ВЕДУЩИХ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ЖУРНАЛОВ  
ВЫСШЕЙ АТТЕСТАЦИОННОЙ КОМИССИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

## **УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Государственный научный центр Российской Федерации –  
Институт медико-биологических проблем  
Российской академии наук»

**Журнал зарегистрирован в Государственном комитете РФ по печати 28.02.1995,  
рег. № 01072, лицензия ИД № 05859 от 18.09.2001 г.**

© Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, 2018  
© State Research Center RF – Institute of Biomedical Problems Russian Academy of Sciences, 2018

Все права зарегистрированы. Никакая часть журнала не может быть воспроизведена  
каким-либо способом без письменного разрешения Издателя  
All rights reserved. No part of this journal may be reproduced in any form by any means without  
written permission of the Editorial Board

**Метаданные статей, опубликованных в журнале, доступны в базе данных РИНЦ  
([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) и на сайте журнала [journal.imbp.ru](http://journal.imbp.ru)**

Выпускающий редактор О.Г. Сорокин  
Редакторы: С.О. Николаев, С.М. Плаксина  
Корректор М.Е. Козлова  
Перевод Л.М. Смирновой  
Компьютерная верстка Е.В. Рзаевой

Адрес: 123007, Москва, Хорошевское шоссе, д. 76а, метро «Полежаевская»,  
Государственный научный центр РФ – Институт медико-биологических проблем РАН  
Редакция: тел.: 8 (499) 195-68-74, факс: 8 (499) 195-22-53, эл. почта: [library@imbp.ru](mailto:library@imbp.ru)  
Секретарь: Муромцева Т.С., тел.: 8 (499) 195-65-12, эл. почта: [arhiv@imbp.ru](mailto:arhiv@imbp.ru)

Сдано в набор 29.03.2018  
Подписано в печать 09.04.2018  
Формат 60 × 84 1/8  
Гарнитура Tahoma  
Печать офсетная  
Усл. печ. л. 9,06  
Тираж 200 экз  
Заказ № 101

Отпечатано в типографии ООО ИПЦ «Научная книга».  
Адрес: 394030, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 116.

## Содержание

## Contents

Ильин Е.А., Потапов А.Н. Академик Анатолий Иванович Григорьев (к 75-летию со дня рождения) 5

Ilyin E.A., Potapov A.N. Academician Anatoly Ivanovich Grigoriev (to the 75th anniversary of the birthday)

## Обзоры

## Reviews

Орлов О.И., Черногоров Р.В., Переведенцев О.В., Поляков А.В. Использование технологий компьютерного ассистирования для оптимизации средств оказания медицинской помощи применительно к пилотируемым межпланетным космическим полетам 10

Orlov O.I., Chernogorov R.V., Perevedentsev O.V., Polyakov A.V. Use of the computer-assisted technologies for optimization of medical care means in piloted space exploration missions

## Экспериментальные и общетеоретические исследования

## Experimental and Theoretical Investigations

Фомина Е.В., Лысова Н.Ю. Регрессионная модель как основа индивидуального подхода к построению системы профилактики неблагоприятного влияния невесомости 16

Fomina E.V., Lysova N.Yu. Regression model as a core of the individual approach to building the system of countermeasures to the adverse effects of microgravity

Степанова С.И., Карпова О.И., Нестеров В.Ф., Галичий В.А., Королёва М.В. Режим труда и отдыха российского космонавта в 340-суточном полете на Международной космической станции 24

Stepanova S.I., Karpova O.I., Nesterov V.F., Galichiy V.A., Koroleva M.V. Work and rest cycle of the Russian cosmonaut in the 340-day mission on the International space station

Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г. Оценка индивидуальных доз космонавтов по показаниям бортовых дозиметров 29

Mitrikas V.G., Khorosheva E.G. Calculation of personal doses to cosmonauts by readings of the board dosimeters

Поляков А.В., Алтунин А.А., Крючков Б.И., Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Усов В.М. Использование роботов-спасателей при развитии медицинских нештатных ситуаций во время внекорабельной деятельности на поверхности Луны 34

Polyakov A.V., Altunin A.A., Kryuchkov B.I., Motienko A.I., Ronzhin A.L., Usov V.M. Use of rescue robots in off-nominal medical situations during extravehicular activities on the Moon surface

Богомолов В.В., Кондратенко С.Н., Поляков А.В., Ковачевич И.В., Репенкова Л.Г. Фармакокинетика верапамила и гемодинамические показатели в условиях антиортостатической гипокинезии 42

Bogomolov V.V., Kondratenko S.N., Polyakov A.V., Kovachevich I.V., Repenkova L.G. Pharmacokinetics of Verapamil and hemodynamic indices during head-down bed rest

Морева Т.И., Кriuшев Е.С., Морева О.В., Пасекова О.Б. Влияние «сухой» иммерсии на кровоток по яремным венам и церебральному венозному синусу по данным ультразвуковых методов исследования 48

Moreva T.I., Kriushev E.S., Moreva O.V., Pasekova O.B. Effect of dry immersion on blood flow in jugular veins and cerebral venous sinus: ultrasonic methods of investigation

Дешевая Е.А., Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Шубралова Е.В., Новикова Н.Д., Гуридов А.А., Цыганков О.С. Выживание микроорганизмов на тестовых объектах при вакуумировании

54

Deshevaya E.A., Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., Shubralova E.V., Novikova N.D., Guridov A.A., Tsygankov O.S. Survival of microorganisms on test objects during vacuumization

### **Водолазная медицина**

### **Diving Medicine**

Семенцов В.Н., Иванов И.В. Водолазная аксидентология как актуальное направление водолазного дела и водолазной медицины

60

Sementsov V.N., Ivanov I.V. Diving accidentology as a mainstream of diving and diving medicine

### **Спортивная медицина**

### **Sports Medicine**

Пастухова И.В., Сафонов Л.В., Машковский Е.В. Сравнительный анализ показателей работоспособности лыжников-гонщиков с поражением опорно-двигательного аппарата в многолетнем периоде наблюдений

69

Pastukhova I.V., Safonov L.V., Mashkovsky E.V. Comparative performance analysis of cross country skiers with impairments of the musculoskeletal apparatus based on a long-term follow-up

## АКАДЕМИК АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ГРИГОРЬЕВ (К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

Ильин Е.А., Потапов А.Н.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: ilyine@imbp.ru

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-5-9



*Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН и редколлегия журнала «Авиакосмическая и экологическая медицина» сердечно поздравляют академика Анатолия Ивановича Григорьева с юбилеем и желают доброго здоровья, благополучия и успехов в науке и научно-общественной деятельности.*

23 марта 2018 г. исполнилось 75 лет академику Анатолию Ивановичу Григорьеву – советнику РАН, научному руководителю Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем РАН (ИМБП). Своими достижениями в науке А.И. Григорьев в значительной степени обязан ИМБП, а ИМБП, в свою очередь,

обязан А.И. Григорьеву за его выдающийся вклад в космическую медицину, космическую и гравитационную физиологию и в дальнейшее развитие института. Писать об Анатолии Ивановиче нам легко, так как мы знакомы с его научной и научно-общественной деятельностью с первых дней его появления в ИМБП, к тому же на протяжении нескольких десятилетий мы работаем с ним в тесном контакте. Единственная трудность в написании заключалась в том, как уложиться с рассказом об этом многогранном, талантливом человеке в рамках журнальной статьи.

А.И. Григорьев приступил к работе в ИМБП в 1966 г. после окончания 2-го Московского медицинского института и прошел в ИМБП путь от аспиранта до директора Института (1988), а впоследствии (с 2008 г.) его научного руководителя. Учителями и наставниками А.И. Григорьева в ИМБП были выдающиеся ученые академики В.В. Парин и О.Г. Газенко.

Круг научных интересов А.И. Григорьева широк, однако его основные научные работы относятся к изучению закономерностей изменений и механизмов адаптации различных функциональных систем человека и животных при воздействии факторов космического полета (КП).

Наиболее известны, ставшие классическими, фундаментальные исследования А.И. Григорьева о состоянии почек, костной ткани и гормональной регуляции водно-солевого обмена в условиях КП и в наземных экспериментах с антиортостатической гипокинезией. Проведенные исследования позволили выявить следующее: волнообразный характер изменений водно-солевого гомеостаза; фазовую динамику активности волюморегулирующих гормонов и других биологически активных веществ, контролирующих водно-солевой обмен; снижение уровня гидратации и перераспределение жидких сред организма между различными водными секторами; взаимозависимость изменений волюмо-, осмо- и ионорегуляции во время КП и в реабилитационный период; развитие отрицательного баланса основных электролитов (особенно кальция), ведущего к увеличению рисков костных травм, образованию мочевых камней и эктопической кальцификации мягких тканей и сосудов при длительных КП.



В работах А.И. Григорьева получены данные о перераспределении жидких сред организма как пусковом механизме гемодинамических сдвигов при переходе от условий земной гравитации к невесомости, приводящих, в частности, к формированию специфического водно-солевого гомеостаза.

На основе многочисленных исследований в условиях КП и после их завершения А.И. Григорьевым был сделан вывод о важной роли водно-солевого гомеостаза в адаптации организма человека к условиям невесомости и разработаны подходы для предотвращения и коррекции нежелательных отклонений.

А.И. Григорьевым с сотрудниками выполнены целенаправленные исследования состояния костной ткани и метаболизма кальция. При обследовании космонавтов установлены уменьшение массы скелета и деминерализация костной ткани, наиболее выраженные в трабекулярных структурах костей нижней половины скелета. Аналогичные результаты были получены в экспериментах на животных, экспонированных на биоспутниках «Бион». Ряд работ А.И. Григорьева с сотрудниками в последние годы был посвящен выяснению клеточных и молекулярных механизмов развивающихся в невесомости изменений в костной ткани. При этом было установлено, что наблюдаемая резорбция костной ткани обусловлена возрастанием активности остеокластов и снижением активности остеобластов. В наземных модельных экспериментах определена высокая гравитационная чувствительность остеогенных клеток – предшественников остеобластов. Изучение костной ткани у космонавтов и больных остеопорозом позволило разработать систему оценки метаболизма костной ткани и подготовить рекомендации для ранней диагностики и лечения остеопороза как в космосе, так и на Земле.

Для А.И. Григорьева характерен системный подход к планированию и проведению исследований и анализу полученных результатов. Под руководством А.И. Григорьева проведен большой цикл исследований по изучению влияния условий КП на обмен веществ, вестибулярную, сердечно-сосудистую, сенсорную, нервно-мышечную, костную и иммунную системы.

Полеты биоспутников, в которых выполнен обширный диапазон сравнительно-физиологических исследований, позволили получить уникальные данные об особенностях и механизмах адаптации к условиям невесомости организмов, находящихся на различных уровнях филогенетического развития. Эти данные являются значительным вкладом в установление роли гравитации в эволюции физиологических функций.

Полученные А.И. Григорьевым и сотрудниками Института результаты исследований на людях и животных в КП послужили основой для выяснения закономерностей адаптации живых систем при

воздействии факторов КП. Согласно выдвинутой А.И. Григорьевым гипотезе, формирование гомеостаза в невесомости происходит в несколько этапов. С устранением гравитационнозависимых влияний на организм активируются срочные адаптивные реакции. Затем, по мере возникновения функциональных и структурных сдвигов, вовлекаются реакции, определяющие долговременную адаптацию. Происходит изменение состояния различных функциональных систем организма, структурная перестройка ряда тканей и органов, устанавливается новый уровень энергетического и пластического обмена, усиливаются катаболические процессы и изменяются нейроэндокринные механизмы регуляции. В результате возникает новый, относительно стабильный уровень функционирования основных систем организма в КП.

Выполненные под руководством А.И. Григорьева наземные модельные эксперименты и полетные исследования позволили обосновать, а в последующем разработать и внедрить в практику КП методы медицинского контроля, прогноза и управления состоянием человека, создать комплекс технологий профилактики неблагоприятного воздействия невесомости и бортовую систему оказания медицинской помощи.

Основой медицинского контроля в КП стал комплексный мониторинг, направленный на оценку текущего состояния здоровья космонавтов, динамическое наблюдение за основными функциями их организма и средой обитания, контроль процессов регуляции и адаптации к необычным условиям жизнедеятельности. Структура медицинского мониторинга позволяет диагностировать неблагоприятные состояния, которые могут развиваться в полете и при необходимости проводить экстренные обследования по показаниям. Разработана и эффективно функционирует система минимизации медицинских рисков при возможных отказах средств жизнеобеспечения и технических проблемах при выполнении полетных операций.

При активном участии и под руководством А.И. Григорьева разработана и успешно реализована на всех этапах длительных КП бортовая система профилактических мероприятий, включающих физические тренировки с использованием бегущей дорожки, велоэргометра и силовых тренажеров, создание нагрузки по продольной оси тела с помощью костюма «Пингвин», низкочастотную электростимуляцию мышц, воздействие отрицательного давления на нижнюю часть тела с помощью пневмовакуумного костюма «Чиби», лекарственные препараты и другие средства профилактики возможных нарушений функционального состояния организма в КП. Важными элементами системы на начальном этапе полета являются профилактика и купирование адаптационного синдрома, в частности, вестибуловегетативных нарушений, а на завершающем – мероприятия для улучшения переносимости

перегрузок спуска с орбиты и предупреждения послеполетной ортостатической неустойчивости.

Исследования, выполненные во время и после длительных (до года и более) полетов на орбитальной станции «Мир», показали, что российская система профилактики является эффективной для предотвращения или снижения отрицательных эффектов воздействия невесомости на организм, что послужило основой для ее использования в медицинском обеспечении сегодняшних и будущих полетов экипажей на Международной космической станции.

Бортовая система оказания медицинской помощи как составная часть системы медицинского обеспечения КП построена по нозологическому принципу. Она разрабатывалась на основе современных передовых достижений клинической медицины с учетом специфических условий КП и включает бортовую аптечку, набор лечебных и профилактических специализированных медицинских упаковок для неотложной помощи и упаковок с лекарствами для лечения возможных заболеваний, повреждений и нарушений функционального состояния.

При участии А.И. Григорьева разработаны научно-методические материалы по обеспечению радиационной безопасности экипажей орбитальных комплексов и создана в ИМБП постоянно действующая Служба радиационной безопасности КП, оснащенная средствами для непрерывного контроля радиационных условий на трассе полета и в обитаемых отсеках, включая оценку доз облучения и радиационного риска членов экипажа, разработку и реализацию рекомендаций по максимальному снижению радиационной опасности для экипажа. Учитывая перспективу межпланетных экспедиций, в последние годы А.И. Григорьев большое внимание уделяет изучению влияния тяжелых заряженных ионов на живые системы и комбинированному воздействию космической радиации и невесомости.

В фундаментальных трудах А.И. Григорьева детально проанализированы изменения после длительных КП в состоянии многих систем организма, требующие для своего восстановления специальных мероприятий по реабилитации здоровья космонавтов в послеполетный период. По его инициативе усовершенствован ряд средств и методов для послеполевой реабилитации, созданы медико-эвакуационный комплекс и медицинская аппаратура для обследования и оказания медицинской помощи космонавтам на месте приземления, разработаны методы оказания медицинской помощи после полета, а также разработан комплекс методов и средств восстановления здоровья космонавтов после длительных полетов с использованием индивидуальных схем и режимов восстановительно-лечебных мероприятий.

Основной задачей применения разработанной под руководством и при личном участии А.И. Григорьева системы медицинского обеспечения

полетов экипажей на орбитальных станциях является сохранение здоровья и работоспособности членов экипажей, достаточных для эффективного выполнения полетных программ, а также благоприятного течения реадaptации на фоне проведения адекватных восстановительно-лечебных мероприятий. Важно отметить активную роль космонавтов, особенно врачей-космонавтов, в реализации этой системы.

Достижения в создании и успешной эксплуатации российской системы медицинского обеспечения здоровья и работоспособности космонавтов в длительных КП служат реальной предпосылкой для разработки концепции медико-биологического обеспечения полетов человека в дальний космос. В ИМБП проводятся исследования и разработки в этом направлении, лидером которых является А.И. Григорьев. Под его руководством проведены многочисленные исследования в условиях изоляции, результаты которых отражены в большом числе публикаций и докладов на крупных российских и международных форумах.

Наиболее значимым в этом направлении стал проведенный в ИМБП международный 520-суточный эксперимент по моделированию некоторых условий межпланетного полета (проект «Марс-500»). В этом эксперименте была отработана система медицинского обеспечения здоровья и работоспособности экипажа, смоделированы технологические операции по «высадке» на Марс, получены важные данные о динамике состояния основных систем организма в условиях длительной изоляции. Эксперимент получил высокую оценку мировой научной общественности.

В последнее время А.И. Григорьев уделяет большое внимание планированию медико-биологического обеспечения полетов человека на окололунной орбитальной станции с возможной высадкой экипажа на поверхность Луны. При этом полеты на Луну рассматриваются им как этап будущих полетов человека на Марс.

А.И. Григорьев активно участвует во внедрении достижений космической медицины в общую физиологию человека и практическое здравоохранение. Многосторонние систематические исследования всех жизненных процессов, протекающих в организме здорового человека в условиях КП, позволили лучше познать нормальную физиологию человека, оценить роль гравитационного фактора в функционировании кардиореспираторной, двигательной и нейросенсорной систем. Можно утверждать, что именно благодаря космонавтике пополнились знания «земных» медиков о механизмах пространственной ориентации человека, вестибулярном аппарате, его строении и функции, сведения о биомеханике, метаболизме, сердечно-сосудистой и центральной нервной системах. Наверное, наиболее известными примерами такого обогащения знаний являются проблемы

гипокинезии и болезни движения, общие для жизни человека в космосе и на Земле.

А.И. Григорьеву вместе с сотрудниками ИМБП и клиницистами ряда медицинских учреждений удалось добиться практической реализации в системе отечественного здравоохранения многих уникальных достижений космической медицины. В частности, разработан ряд средств для профилактики и коррекции кинетозов – двигательных расстройств. Это специальные нагрузочные костюмы, средства нейромышечной стимуляции, которые в ходе испытаний удалось адаптировать к потребностям клиники для детей с церебральным параличом и лиц, перенесших черепно-мозговые травмы и инсульт. О разработке рекомендаций по методам диагностики и лечения остеопороза в клинической практике упоминалось выше.

Космической медициной разработаны и внедрены в здравоохранение также новые критерии и нормативы переносимости человеком функциональных нагрузок, таких как дозированная физическая нагрузка на велоэргометре, пассивная ортостатическая и антиортостатическая пробы, проба с воздействием отрицательного давления на нижнюю половину тела. Они используются при диагностике заболеваний, их применяют врачи для оценки состояния здоровья, функциональных и резервных возможностей практически здоровых людей, работа которых проходит в экстремальных условиях.

На основе многолетних исследований в области космической медицины А.И. Григорьевым с сотрудниками разработана концепция медицины здорового человека. С его активным участием создана оздоровительная медицинская технология «Навигатор здоровья», которая позволяет объективно оценивать при проведении массовых обследований населения уровень физического здоровья, формировать индивидуальные оздоровительные программы.

Будучи вице-президентом РАН, А.И. Григорьев осуществлял большую научно-организационную работу по эффективному развитию потенциала отечественной науки и его применению в народном хозяйстве, повышению престижа российской науки в мировом сообществе. Значительное внимание А.И. Григорьев уделял привлечению научно-исследовательских институтов РАН к решению актуальных задач медицины и здравоохранения. Являясь координатором Программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине», А.И. Григорьев способствовал развитию новых представлений об этиологии и патогенезе ряда социально значимых заболеваний, апробации новых подходов к их диагностике, лечению и профилактике, созданию новых материалов для замещения биологических тканей и адресной доставки лекарственных средств, разработке уникальных медицинских приборов.

Заметное место в многогранной деятельности А.И. Григорьева занимает подготовка научных

кадров. Он возглавляет ведущую научную школу по космической биологии и медицине. Под его руководством успешно защищены 8 докторских и 12 кандидатских диссертаций. С 1996 г. является заведующим кафедрой экологической и экстремальной медицины на факультете фундаментальной медицины МГУ им. М.В. Ломоносова, где читает лекционные курсы по космической физиологии, экологической физиологии и телемедицине. Будучи большим энтузиастом внедрения современных технологий в образовательный процесс, А.И. Григорьев одним из первых разработал всеобъемлющую концепцию дистанционного образования на базе опыта космической телемедицины. Он автор и соавтор более 500 научных публикаций, включая 7 монографий и 16 глав в различных книгах, имеет более 80 патентов и авторских свидетельств.

А.И. Григорьев выполняет также большой объем работ по издательской деятельности в РАН и, несмотря на свою занятость, принимает активное участие в работе различных комиссий и рабочих групп, в том числе международных.

А.И. Григорьев – всемирно известный ученый, признанный лидер в области космической медицины и биологии. Его достижения в науке отмечены многими почетными званиями и международными наградами, а заслуги перед отечеством – государственными орденами и медалями Российской академии наук, Роскосмоса, Федерации космонавтики России, Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского и Федерального медико-биологического агентства.

Несмотря на высокое положение А.И. Григорьева в науке и обществе, он остается скромным, доступным и общительным человеком, готовым помочь словом и делом тем, кто к нему обращается за советом и помощью.

#### *Наша справка*

Анатолий Иванович Григорьев родился 23 марта 1943 г. в с. Меделевка Житомирской области (Украина, СССР). **Образование:** врач, окончил лечебный факультет 2-го Московского медицинского института им. Н.И. Пирогова в 1966 г.

**Ученые степени и звания:** доктор медицинских наук (1980), профессор (1986), действительный член Российской академии медицинских наук (1993), действительный член Российской академии наук (1997), действительный член Международной академии astronautики (1985), действительный член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (1997), почетный доктор Российской военно-медицинской академии (2012), действительный член Международной академии наук (1994), член Нью-Йоркской академии наук (1994), иностранный член Украинской национальной академии наук (2000).



*Профессиональная и научно-общественная деятельность*

- Советник Российской академии наук (с 2017 г.).
  - Директор Государственного научного центра РФ – Институт медико-биологических проблем (ИМБП) (1988–2008).
  - Научный руководитель ИМБП (с 2008 г.).
  - Член Президиума РАН (2001–2017).
  - Координатор Программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» (2002–2009).
  - Академик-секретарь Отделения биологических наук РАН (2002–2009).
  - Вице-президент РАН (2008–2017).
  - Главный медицинский специалист Российского космического агентства (1996–2008).
  - Руководитель медицинского обеспечения космических полетов экипажей на борту орбитальных станций «Салют» (с 1983 г.), «Мир» (1986–2001), Международной космической станции (с 2001 г.).
  - Заместитель председателя Координационного научно-технического совета Госкорпорации «Роскосмос» и РАН (с 1995 г.).
  - Сопредседатель Многостороннего совета по медицинской политике на Международной космической станции.
  - Член Президентского совета по науке, технологиям и образованию (2004).
  - Член попечительского совета Российского научного фонда.
  - Член Межведомственной рабочей группы по направлению «Научное обеспечение повышения качества жизни при Совете при Президенте РФ».
  - Член бюро Совета РАН по космосу.
  - Член Международной комиссии по гравитационной физиологии (1992–2007).
  - Член бюро отделения физиологических наук РАН (с 2016 г.).
  - Сопредседатель советско-российско-американской совместной рабочей группы по исследованиям в области космической биомедицины и биологии (с 1989 г.).
  - Вице-президент Международной академии астронавтики (1993–2003).
  - Вице-президент Международной астронавтической федерации (2004–2008).
- Редакционно-издательская деятельность*
- Главный редактор журналов «Авиакосмическая и экологическая медицина» (1989–2009), «Технология живых систем» (с 2004 г.), «Физиология человека» (с 2008 г.).
  - Председатель научно-издательского совета РАН (2007–2017).
  - Заместитель председателя научно-издательского совета РАН (с 2017 г.).
  - Член редакционных советов журналов «Вестник Российской академии наук», «Доклады Академии наук», «Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова», «Успехи физиологических наук».

- Председатель редакционных советов журналов Acta Naturale, «Авиакосмическая и экологическая медицина».

*Награды:* орден «Знак почета» (1976); орден Трудового Красного Знамени (1982); ордена «За заслуги перед Отечеством» IV, III, II степени (2003, 2008, 2013); лауреат Государственной премии СССР (1989); лауреат Государственной премии РФ (2002, 2013); лауреат премии Правительства РФ (1996, 2003); орден «Знамя труда» (ГДР, 1985); медаль «Юрий Гагарин» Федерации космонавтики СССР (1984); медаль «С.П. Королев» Федерации космонавтики СССР (1987); премия G. Strughold Американской авиакосмической медицинской ассоциации (1988); медаль J. Purkinje Чехословацкой академии наук (1988); золотая медаль NASA «За заслуги перед обществом» (1993); нагрудный знак Big Sign for Merits (Австрия, 1993); премия Международной академии астронавтики за книги о науках о жизни (1995, 1999); медаль COSPAR за международное сотрудничество (1996); премия «Памяти Allan D. Emil» Международной астронавтической федерации; премия Melbourne W. Boynton Американской астронавтической ассоциации (1996); медаль Hermann Obert (ФРГ, 1996); премия Francois Xavier Begnoud (США, 1999); премия Louis H. Bauer Американской авиакосмической медицинской ассоциации (США, 2001); премия Международной академии астронавтики за обеспечение полетов на станции «Мир» (2001); орден Республики Казахстан Dostyk II степени (2001); медаль NASA Silver snoopy (2002); медаль им. Н.В. Тимофеева-Ресовского (2003); премия В.В. Парина Российской академии медицинских наук (1996, 2003); медаль «Звезда Икара» Российского космического агентства (2003); орден Почетного легиона (Франция, 2004); медаль Merenyi-Scholtz Gustav Венгерского общества авиационной и космической медицины (2005); премия «Триумф» за научные достижения (2006); золотая медаль им. В.Ф. Уткина (2007); медаль им. С.И. Вавилова (2008); медаль им. Н.И. Пирогова (2008); Демидовская премия (2008); нагрудный знак «А.И. Бурназян» (2008); премия им. А.А. Ухтомского (2009); Национальная премия «Призвание» (2009); премия им. Л.А. Орбели (2013); золотая медаль им. И.М. Сеченова (2013); нагрудный знак Naturaliste Eminent (2013); премия им. М.В. Ломоносова (2014); премия Американской авиакосмической медицинской ассоциации «За выдающийся вклад в медико-биологические исследования и космическую медицину» (2015).

Поступила 06.03.2018

**ACADEMICIAN ANATOLY IVANOVICH GRIGORIEV (TO THE 75TH ANNIVERSARY OF THE BIRTHDAY)**

**Ilyin E.A., Potapov A.N.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 5–9

## ОБЗОРЫ

УДК 615.035.1

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЬЮТЕРНОГО АССИСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ СРЕДСТВ ОКАЗАНИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПИЛОТИРУЕМЫМ МЕЖПЛАНЕТНЫМ КОСМИЧЕСКИМ ПОЛЕТАМ

Орлов О.И., Черногоров Р.В., Переведенцев О.В., Поляков А.В.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: chernogorov\_rv@mail.ru

*Используемая в российском сегменте Международной космической станции система оказания медицинской помощи в космическом полете (КП) ориентирована на обеспечение космических экипажей, выполняющих орбитальные полеты. Для нее характерен приоритет телемедицинского сопровождения мероприятий оказания медицинской помощи над автономно проводимыми медицинскими мероприятиями в полете.*

*Многолетний опыт показал эффективность существующей системы медицинского обеспечения орбитальных КП, однако при реализации пилотируемой экспедиции за пределы низких околоземных орбит добавляются существенные ограничения, требующие изменения подходов к оказанию медицинской помощи. Одной из особенностей этих полетов будет возрастание времени автономной жизнедеятельности экипажа. При этом велика вероятность, что экипажу придется самому решать все вопросы, связанные с оказанием медицинской помощи в полете. В связи с этим одним из элементов повышения эффективности системы оказания медицинской помощи в межпланетных КП, могут стать медицинские системы компьютерного ассистирования.*

*Созданное в ГНЦ РФ – ИМБП РАН программное обеспечение для компьютерного ориентирования в медицинских средствах и прикладной документации по оказанию медицинской помощи на борту позволяет вывести на новый качественный уровень повседневное использование бортовых медицинских ресурсов экипажем российского сегмента Международной космической станции в ходе текущих орбитальных КП, а также стать прототипом медицинской системы поддержки принятия решения в составе интеллектуального контура будущих пилотируемых космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** медицинское обеспечение, компьютерное ассистирование, средства оказания медицинской помощи, телемедицина, система поддержки принятия решений, межпланетный космический полет, пилотируемый космический аппарат.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 10–15.

**DOI:** 10.21687/0233-528X-2018-52-2-10-15

Результаты фундаментальных исследований, а также данные, полученные в ходе медицинского сопровождения космонавтов в полете и в послеполетном периоде, показали, что космический полет (КП) сопровождается воздействием на человека различных неблагоприятных факторов, которые могут привести к ухудшению функционального состояния и снижению работоспособности членов экипажа пилотируемого космического аппарата (ПКА) [1]. Также не исключается возникновение нештатных медицинских ситуаций, например, развитие острых заболеваний и различного рода травматических повреждений [2].

Существующую в настоящее время систему медицинского контроля и оказания медицинской помощи в КП можно рассматривать в виде 2 основных составляющих: локальное обеспечение размещенными на борту ПКА средствами диагностики и оказания медицинской помощи и удаленное сопровождение медицинской деятельности экипажа ПКА наземной группой медицинского обеспечения (ГМО) с использованием телемедицинских технологий (рис. 1).

Локальное (бортовое) медицинское обеспечение ПКА включает оборудование для проведения в полете диагностических мероприятий и биомедицинских исследований, а также комплекты медицинского имущества (аппараты, инструменты и фармакологические средства), предназначенные для оказания медицинской помощи и выполнения лечебно-профилактических мероприятий.

Средства оказания медицинской помощи (СОМП) на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) включают наборы лекарств для перорального приема, местной терапии и внутримышечных инъекций. СОМП поставляются на РС МКС в составе медицинских упаковок и предназначены для оказания помощи при травмах, ожогах и лечения легких форм заболеваний, развитие которых наиболее вероятно в полете [3].

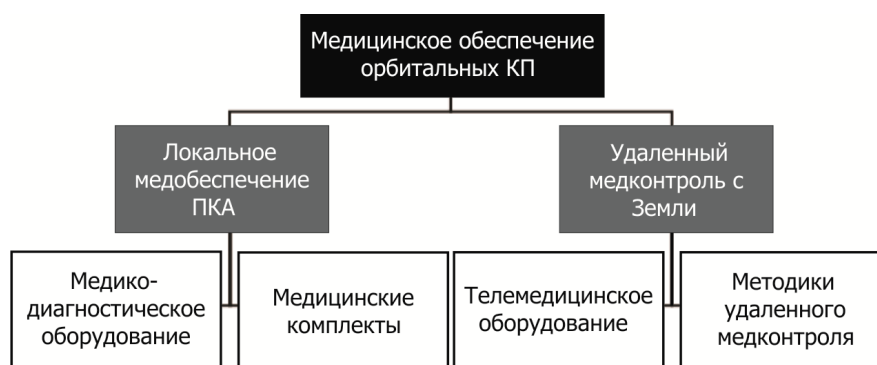


Рис. 1. Структурная схема системы оказания медицинской помощи в КП

На РС МКС поставляется более 18 различных медицинских упаковок, а также 2 аптечками комплектуется транспортный пилотируемый корабль (ТПК) типа «Союз». В состав медукладок входит свыше 140 наименований лекарственных препаратов, которые по их назначению можно объединить ориентировочно в 20 фармакологических групп. В упаковках поставляется и другое медицинское имущество (перевязочные материалы, иммобилизирующие шины, инструментарий и др.).

Для поддержки деятельности экипажа МКС в каждую медицинскую упаковку помещаются краткие инструкции на русском и английском языках. Более полная методическая документация в виде методических указаний для космонавтов по оказанию само- и взаимопомощи входит в состав бортовой аптечки транспортно-пилотируемого корабля (ТПК) типа «Союз» и медукладки ЖКУ (желудочно-кишечные и урологические средства), доставляемых на РС МКС [4].

Удаленное медицинское сопровождение экипажа РС МКС включает медицинский контроль на активных участках полета и при выполнении динамических операций, методики текущего и периодического медицинского контроля, включающего исследования реакции сердечно-сосудистой системы в покое и при нагрузочных пробах, антропометрические исследования, биохимические исследования крови и мочи и др. [5].

Для реализации методик объективного медконтроля широко используются специализированное телемедицинское программно-аппаратное обеспечение и коммуникационные технологии. Это позволяет привлекать наземных медицинских специалистов для медицинского сопровождения космонавтов в полете при выполнении ими функциональных нагрузочных проб и организации оказания медицинской помощи при возникновении нештатных медицинских ситуаций.

Многолетний опыт обеспечения орбитальных КП показал достаточную эффективность существующей российской системы оказания медицинской помощи, несмотря на отсутствие в составе экипажа

многопрофильного врача, ограниченный состав и объем медицинского имущества на борту ПКА.

С началом освоения человечеством дальнего космоса, реализацией полетов за пределы околоземной орбиты на организацию оказания медицинской помощи в полете окажут влияние дополнительные трудности, связанные с отсутствием возможности допоставки на борт ПКА необходимых ресурсов, в том числе и СОМП. Возникают проблемы получения консультативной помощи от медицинских специалистов, находящихся на Земле, связанные со значительной задержкой прохождения телекоммуникационных сигналов и ограничением их объемов. Становится невозможным срочное возвращение пострадавшего члена экипажа на Землю. Следовательно, в таких условиях при возникновении медицинской ситуации будет необходимо обеспечить оказание медицинской помощи, используя только возможности имеющегося локального медобеспечения ПКА.

Таким образом, для организации эффективного медицинского обеспечения межпланетной экспедиции потребуется осуществить:

- переориентацию медобеспечения ПКА с удаленного телемедицинского сопровождения на автономное медицинское самообеспечение средствами локального компонента в составе бортового медицинского центра;
- повышение возможностей средств диагностики, профилактики и оказания медицинской помощи, поставляемых на ПКА;
- перевод методики работы экспертов наземной группы контроля при телемедицинском консультировании из режима «реального времени» в «отсроченный»;
- внедрение интеллектуальных компьютерных систем для диагностики и управления состоянием здоровья космонавтов [6].

В связи с тем что поставляемые на ПКА средства оказания медицинской помощи предполагают значительный по номенклатуре и количеству ассортимент и на текущий момент снабжаются сопроводительными документами исключительно в



Рис. 2. Основные модули интерфейса СПО СОМП

печатном виде, оперативно ориентироваться в них при возникновении медицинской нештатной ситуации весьма затруднительно, что в случае автономного КП может привести к недопустимым задержкам в ее разрешении.

Данная проблема касается не только медицинской, но и всей остальной печатной бортовой документации РС МКС, и уже ведутся разработки унифицированной многофункциональной информационной системы (МИС) для решения задач методического обеспечения экипажа актуальными электронными версиями бортовой документации по служебным системам РС МКС, бортовым процедурам, внекорабельной деятельности, ремонтно-техническому обслуживанию и др. [7].

Многофункциональная информационная система предполагает наличие синхронизируемых наземного и бортового программно-аппаратных комплексов. Предложены решения по автоматизированному (без участия экипажа) развертыванию пакетов обновлений для бортового модуля МИС [8].

Поскольку МИС также предусматривает наличие бортового модуля медицинского обеспечения, то в соответствии с ее концепцией и вышеуказанными задачами предлагается инсталляция на медицинском компьютере ПКА специального справочно-поискового программного обеспечения для быстрой и удобной работы с комплектами СОМП в составе средств компьютерного ассистирования при оказании медицинской помощи на борту ПКА [9].

Устанавливаемое на борту ПКА специализированное программное обеспечение (СПО) должно быть простым, удобным и надежным. Его использование должно позволить экипажу получать

наглядное представление о перечне медсредств в составе бортовых аптек и медицинских упаковок, поставляемых на ПКА, их количестве и сроках годности. При возникновении медицинских ситуаций СПО должно являться инструментом быстрого подбора соответствующих медсредств с указанием их принадлежности к конкретной медукладке, месторасположения в ней и методической информации по оказанию медицинской помощи.

Прототип такого СПО СОМП создан в ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Для хранения информации в СПО СОМП используется реляционная база данных (РБД), содержащая всю необходимую для экипажа информацию о составе и количестве, расположении в упаковках и методиках использования имеющихся на ПКА медсредств (рис. 2).

Предусмотрено 2 режима функционирования СПО СОМП, реализованных посредством дифференцированных программных модулей: *режим редактирования* базы данных СОМП и *режим выдачи*.

*Режим редактирования* предназначен только для специалистов, осуществляющих комплектование медицинских упаковок, поставляемых на ПКА. С помощью соответствующего модуля они поддерживают РБД СПО СОМП в актуальном состоянии.

В *режиме выдачи*, предназначенном для экипажа ПКА, осуществляется быстрый поиск информации в РБД СПО СОМП, наглядно скомпонованная выдача результатов поисковых запросов и удобная навигация по ним, включая *классификацию и рубрикацию медицинских средств*, вывод «карточек» с описанием искомого средства, инструкции по его использованию, расположению в упаковках, а также получение перечня заболеваний, при которых возможно



использование данного средства; *классификацию и рубрикации заболеваний (медсостояний)*, вывод «карточек» с полным описанием искомого заболевания, сопутствующих симптомов, методические указания по лечению и автоматическая визуализация имеющихся в наличии медицинских средств, применение которых показано при конкретном заболевании; *перечень имеющихся медицинских упаковок* с указанием и возможностью сортировки по количеству, дозировке, фасовке, сроку годности содержащихся в них медицинских средств.

Осуществление эффективного компьютерного ассистирования в рамках автономного медобеспечения межпланетных КП помимо справочно-поискового функционала СПО СОМП потребует также внедрения интеллектуального модуля медицинской системы поддержки принятия решений (МСППР) с целью дальнейшей интеграции вместе с медико-диагностическим оборудованием локального компонента медобеспечения ПКА в единый бортовой медицинский центр.

Мировой опыт разработки медицинских экспертных систем показывает их большую сложность, дифференцированность, ресурсоемкость создания и объемность исходных данных. В связи с этим существующие медицинские экспертные системы зачастую создаются лишь для одной узкоспециализированной медицинской области либо позволяют реализовать только поверхностный многопрофильный скрининг.

В случае создания МСППР для нужд медобеспечения КП на первых этапах разработки имеется возможность снизить объем исходных данных, необходимых для дифференциальной диагностики развившегося в полете патологического состояния и его последующего лечения, так как:

- в КП отправляются отобранные и имеющие высокие показатели здоровья космонавты, прошедшие соответствующую, в том числе и медико-биологическую, подготовку;
- наиболее вероятные медицинские риски КП и нештатные медицинские ситуации прогнозируются заранее.

Опыт медицинского обеспечения космических экспедиций на орбитальные станции «Салют», «Мир» и МКС позволяет заключить, что серьезные клинические проблемы у членов экипажей, как правило, не возникают. Имели место индивидуальные особенности выраженности адаптивных реакций на начальном этапе полета у отдельных членов экипажа, различные незначительные травматические повреждения, аллергические проявления, головные боли, явления десинхроноза, признаки утомления слухового анализатора, единичные случаи уrolитиаза, которые купировались бортовыми средствами или мероприятиями по оптимизации режима труда и отдыха. Описана медицинская ситуация, потребовавшая прерывание полета в связи с некупируемым

бортовыми медицинскими средствами обострением урологического заболевания [10, 11].

Учитывая неблагоприятные факторы полета и данные реальной заболеваемости, был составлен перечень наиболее вероятных нештатных медицинских ситуаций, на основании которого определяется состав и объем поставляемых на ПКА медицинских средств оказания медицинской помощи и разрабатываются медицинские методические указания по их использованию.

Имеющаяся медицинская информация может стать основой рестрикционного базиса для целевой выборки медицинских заболеваний, их классификации, методов диагностики и лечения, а также требований к объему и типу объективных инструментально-диагностических и лабораторных исследований, которые лягут в основу полнофункциональных МСППР для медобеспечения КП за пределы околоземной орбиты. Данная задача известна в теории принятия решений как задача классификации с фиксированным объемом выборки, общей целью которой является обоснованное отнесение наблюдаемого набора признаков к некоторому классу.

В СПО СОМП используется детерминированный подход, в рамках которого применен один из базовых методов проектирования МСППР начального уровня на основе многофакторной выборки, позволяющей по выявленным клиническим симптомам сузить перечень характерных медицинских состояний, при которых встречается указанный симптомокомплекс с отображением наиболее вероятных из них. Это достигается формированием ранжированного списка так называемых синдромов, в каждой строке с которыми указывается степень их объемно-долевого «веса», представленная количеством совпадающих из ранее отмеченных симптомов, на основании чего «синдромы» выстраиваются в убывающем порядке.

Такая модель МСППР является простой и менее ресурсоемкой в процессе создания и эксплуатации на бортовых компьютерах ПКА, а также предусматривает интуитивно-понятный интерфейс взаимодействия с конечными пользователями – членами экипажа ПКА.

Однако использованная модель МСППР в СПО СОМП пока не может справиться с медицинскими ситуациями, выходящими по совокупности признаков и исходных диагностических данных за пределы шаблонных методических указаний СОМП.

Существует ряд решений для дальнейшего совершенствования МСППР СПО СОМП. Одним из них является применение методологии экспертных систем с привлечением элементов теории распознавания образов, в частности искусственных нейронных сетей (ИНС). Интеллектуальные системы на основе нейронных сетей позволяют с успехом разрешать проблемы распознавания образов, прогнозирования, оптимизации, ассоциативной памяти и управления,



т.е. те, где традиционные программно-математические подходы, включая линейные методы, не всегда имеют успешное приложение. Это связано с тем, что организм человека представляет нелинейную систему. Отличительное свойство ИНС состоит в том, что она не программируется, а обучается делать правильные выводы на примерах [12, 13].

Определенный интерес представляет использование вопросно-ответных или QA-систем, представляющих собой информационные системы, способные принимать вопросы и отвечать на голосовые запросы. Преимуществом применения таких систем в МСППР будет их направленность на восприятие нечеткой логики речи человека, что помимо работы со структурированными данными позволит эффективно осуществлять поиск в электронных документах, например, в медицинских справочниках [14].

Таким образом, объединение методологий нечетких множеств, теории нейронных сетей, QA-систем и других методов моделирования в технологиях «мягких» вычислений будет способствовать упрощению процесса обработки медицинских данных, снижению ресурсоемкости итогового программного решения и лучшей совместимости с результатами экспертного оценивания [15], что позволяет рекомендовать их для совершенствования МСППР в составе СПО СОМП.

#### Выводы

1. В ходе подготовки к длительным межпланетным КП необходимо изменить вектор развития медобеспечения КП в сторону автономного функционирования, при этом для повышения эффективности медобеспечения могут использоваться бортовые медицинские системы компьютерного ассистирования в составе интеллектуального контура перспективных ПКА.

2. Специализированное программное обеспечение для компьютерного ориентирования в медицинских средствах и сопроводительной методической документации по оказанию медицинской помощи на борту позволяет вывести на новый качественный уровень повседневное использование СОМП экипажем РС МКС в ходе текущих орбитальных КП, а также может стать прототипом медицинской системы поддержки принятия решения в составе интеллектуального контура систем будущих ПКА, экипажи которых будут выполнять полеты за пределами низких околоземных орбит.

3. Для дальнейшего совершенствования СПО СОМП наиболее целесообразным представляется:

- разграничение уровней доступа к медицинской базе данных СПО СОМП и создание соответствующих интерфейсов в зависимости от медицинской квалификации/подготовленности членов экипажей («базовый», «эксперт» и т.п.) для

повышения эффективности ситуационного и симптоматического поиска медицинских решений и соответствующих медсредств;

- применение методологии экспертных систем и машинного обучения для вывода МСППР-компонента в СПО СОМП на качественно новый уровень;

- интеграция базы данных СПО СОМП с бортовыми системами инвентаризации, включая программно-аппаратные устройства идентификации и выдачи для оперативного поиска на борту необходимых медсредств.

*Работа выполнена в рамках базовой темы РАН, раздел 65.1.*

#### Список литературы

1. Газенко О.Г., Григорьев А.И., Егоров А.Д. Реакции организма человека в космическом полете // Физиологические проблемы невесомости. М., 1990. С. 15–48.  
Gazenko O.G., Grigoriev A.I., Egorov A.D. Reaction of the human body in space flight // Physiological problems of weightlessness. Moscow, 1990. P. 15–48.
2. Пестов И.Д. Медицинские подходы к снижению техногенных рисков: поучительный опыт космической медицины // Авиакосм. и экол. мед. 2006. Т. 40. № 1. С. 48–54.  
Pestov I.D. Medical approaches to technogenic risks mitigation: instructive experience of space medicine // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina 2006. V. 40. № 1. P. 48–54.
3. Богомолов В.В., Самарин Г.И. Медицинское обеспечение здоровья и безопасности экипажей МКС // Международная космическая станция. Российский сегмент. Космическая биология и медицина: В 2 т. М., 2011. Т. 1. С. 33–50.  
Bogomolov V.V., Samarin G.I. Medical support of the health and safety of the crews of ISS // International space station. Russian segment. Space biology and medicine: In 2 v. Moscow, 2011. V. 1. P. 33–50.
4. Гончаров И.Б., Ковачевич И.В., Воробьев В.Е. Оказание медицинской помощи в полете, медицинское обеспечение на месте посадки спускаемого аппарата при приземлении экипажа // Там же. С. 159–163.  
Goncharov I.B., Kovachevich I.V., Vorob'ev V.E. Medical assistance in flight, medical support at the landing site of the descent vehicle when the crew landed // Ibid. P. 159–167.
5. Алферова И.В., Криволапов В.В., Турчанинова В.Ф., Хорошева Е.Г. Мониторинг состояния здоровья космонавтов в полетах на МКС // Там же. С. 53–60.  
Alferova I.V., Krivolapov V.V., Turchaninova V.F., Khorosheva E.G. Monitoring the health of astronauts in space flights on ISS // Ibid. P. 51–62.
6. Григорьев А.И., Орлов О.И., Потапов А.Н. Концепция разработки системы телемедицинского

обеспечения марсианской экспедиции // *Авиакосм. и экол. мед.* 2005. Т. 39. № 4. С. 19–24.

Grigoriev A.I., Orlov O.I., Potapov A.N. Concept of the telemedicine system for a Martian mission // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2005. V. 39. № 4. P. 19–24.

7. Душенко А.Г., Арестов Д.С., Котов А.Г., Горбачев Е.Б. Многофункциональная информационная система поддержки действий экипажа // *Программные продукты и системы*. 2013. № 3. С. 54–61.

Dushenko A.G., Arestov D.S., Kotov A.G., Gorbachev E.B. Multifunctional crew activity support information system // *Programmnye produkty i sistemy*. 2013. № 3. P. 54–61.

8. Кравченко С.И., Андреев Д.А., Брунько Д.В., Горбачев Е.Б. Бортовой комплекс многофункциональной информационной системы Международной космической станции (российский сегмент) // Там же. 2015. № 4 (112). С. 45–47.

Kravchenko S.I., Andreev D.A., Brunko D.V., Gorbachev E.B. The onboard multifunctional information complex of the International space station (Russian segment) // *Ibid.* 2015. № 4 (112). P. 45–47.

9. Ушаков И.Б., Дашевский В.П., Поляков А.В. и др. Применение ассистивных и информационных технологий при использовании средств оказания медицинской помощи космонавтам в российском сегменте Международной космической станции // *Биотехносфера*. 2013. № 4 (28). С. 18–33.

Ushakov I.B., Dashevskiy V.P., Polyakov A.V. et al. Application of assistive technology for improvement of information support of the crew on the ISS when using medical accessories kit and onboard medical manual // *Biotehnosfera*. 2013. №4 (28). P. 18–33.

10. Гончаров И.Б., Жерनावков А.Ф., Ковачевич И.В. Анализ заболеваемости в космическом полете // *Космическая биология и медицина*. М., 2001. Т. 4. Ч. 3. Гл. 5. С. 145–164.

Goncharov I.B., Zhernavkov A.F., Kovachevich I.V. Analysis of the incidence in space flight // *Space biology and medicine*. Moscow, 2001. V. 4. Part 3. Ch. 5. P. 145–164.

11. Богомолов В.В., Егоров А.Д. Развитие системы медицинского обеспечения здоровья экипажей в пилотируемых космических полетах // *Авиакосм. и экол. мед.* 2013. Т. 47. № 1. С. 5–12.

Bogomolov V.V., Egorov A.D. Enhancement of the medical care system for crews on space missions // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2013. V. 47. № 1. P. 5–12.

12. Жариков О.Г., Ковалев В.А., Литвин А.А. Современные возможности использования некоторых экспертных систем в медицине // *Врач и информационные технологии*. 2008. № 5. С. 24–30.

Zharikov O.G., Kovalev V.A., Litvin A.A. Modern possibilities of the use of some expert systems in medicine // *Vrach i informatsionnye tekhnologii*. 2008. № 5. P. 24–30.

13. Лопин В.Н., Прилуцкая И.Е. О нейросетевом подходе поддержки принятия решений амбулаторно-поликлиническими службами // *Вестник новых мед. технологий*. 2006. Т. 13. № 2. С. 160–161.

Lopin V.N., Prilutskaia I.E. About the neural network approach of decision support by outpatient services // *Vestnik novykh meditsinskih tekhnologiy*. 2006. V. 13. № 2. P. 160–161.

14. Соснин П.И., Касапенко Д.В., Павлыгин Э.Д. Вопросно-ответный подход к задачам принятия решений // *Автоматизация процессов управления*. НПО «Марс». 2008. № 2. С. 25–33.

Sosnin P.I., Kasapenko D.V., Pavlygin E.D. Question-answer approach to decision-making tasks // *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya*. NPO «Mars». 2008. № 2. P. 25–33.

15. Федянин В.В. Модели и алгоритмы диагностики пиелонефрита, основанные на нечеткой логике принятия решений в гетерогенном пространстве информативных признаков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Курск, 2016. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01006646716>.

Fedyanin V.V. Models and algorithms for the diagnosis of pyelonephritis, based on fuzzy logic of decision-making in the heterogeneous space of informative features: *Avtoreferat dissertatsii ... kandidata tekhnicheskikh nauk*. Kursk, 2016. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01006646716>.

Поступила 12.10.2017

## USE OF THE COMPUTER-ASSISTED TECHNOLOGIES FOR OPTIMIZATION OF MEDICAL CARE MEANS IN PILOTED SPACE EXPLORATION MISSIONS

Orlov O.I., Chernogorov R.V., Perevedentsev O.V., Polyakov A.V.

*Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia)*. 2018. V. 52. № 2. P. 10–15

*The system of medical care used in Russian segment of the International space station in space missions is directed to support space crews in orbital missions. The system gives the priority to the telemedicine rather than medical procedures performed by crew autonomously.*

*The long experience showed effectiveness of the existing system, however travels beyond the low-Earth's orbit add substantial limitations calling for reconsideration of approaches to the crew medical care. Among the special features of these missions will be increasing time of autonomy. There is a high probability that crews will have to make medical decisions by themselves and computer-assisted systems are likely to be a proper tool of health care.*

*The IBMP-developed software of medical inventory control and practice guidance enhances quality of the day-to-day use of medical resources on the ISS Russian segment and can serve as a prototype of a medical decision support system within the intelligent loop aboard future piloted spacecrafts.*

Key words: health care, computer assistance, medical provisions, telemedicine, decision-making support system, space exploration mission, piloted spacecraft.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 612.812

### РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ КАК ОСНОВА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПОДХОДА К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ ПРОФИЛАКТИКИ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ВЛИЯНИЯ НЕВЕСОМОСТИ

Фомина Е.В.<sup>1, 2, 3, 4</sup>, Лысова Н.Ю.<sup>1, 4</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Московский педагогический государственный университет

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов, Москва

<sup>4</sup>Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН (ИМ СО РАН), г. Новосибирск

E-mail: fomin-fomin@yandex.ru

*Российская система профилактики неблагоприятного влияния невесомости строится с учетом 3 основных факторов, обеспечивающих эффективность локомоторных физических тренировок: метода тренировки (интервальный или равномерный); доли пассивного режима от общего объема локомоций; величины осевой нагрузки, с которой выполняются локомоторные тренировки в процентах от массы тела космонавта. Однако не все члены экипажа строго придерживаются рекомендованных бортовой документацией параметров нагрузки. В работе представлен новый подход к построению системы профилактики, базирующийся на определении совместного влияния осевой нагрузки и доли пассивного режима с использованием множественного линейного регрессионного анализа на основе изменения физической работоспособности в космическом полете и после его завершения.*

Ключевые слова: невесомость, локомоторные тренировки, осевая нагрузка, физическая работоспособность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 16–23.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-16-23

Длительное пребывание в условиях микрогравитации приводит к целому ряду функциональных перестроек, возникающих практически во всех системах организма, лимитирующих физическую работоспособность [1–3]. Локомоторные физические тренировки являются ключевым элементом российской системы профилактики неблагоприятного влияния невесомости [4–6]. При разработке российской системы профилактики локомоторные физические тренировки были выбраны в качестве основного средства ввиду природы развития нарушений в двигательной системе, наиболее эффективно предотвращаемых естественными локомоциями человека. При выполнении локомоторных тренировок в условиях микрогравитации создается естественная необходимость удержания позы, включается в работу

постуральная мускулатура, наиболее подверженная негативному влиянию невесомости [7]. В то же время выполнение локомоторных тренировок сопровождается увеличением опорной афферентации, отсутствие которой в условиях невесомости в соответствии с концепцией И.Б. Козловской приводит к развитию гипогравитационного двигательного синдрома [3]. Опыт, накопленный в космических полетах (КП) на российских и международной космических станциях, позволил выявить 3 основных фактора, обеспечивающих эффективность локомоторных физических тренировок: метод тренировки (интервальный или равномерный); доля пассивного режима от общего локомоторного объема; величина осевой нагрузки, с которой выполняются локомоторные тренировки в процентах от массы тела космонавта [5, 8].

Основу российской системы профилактики составляют 2-разовые физические тренировки, выполняемые по 4-дневному микроциклу. В первые 3 дня микроцикла локомоторные тренировки выполняются ежедневно, по протоколам, рекомендованной бортовой документацией, в 4-й день микроцикла космонавт выполняет локомоторные тренировки в соответствии с личными предпочтениями или отдыхает. Тренировки на силовом тренажере ARED и велотренажере ВБ-3М планируются через день.

В соответствии с бортовой документацией локомоторные тренировки выполняются в интервальном режиме. В 1-й день микроцикла локомоторная тренировка направлена на поддержание физического качества скорость, во 2-й день – сила, в 3-й день – выносливость.

Локомоторные тренировки могут выполняться в 2 режимах работы полотна бегущей дорожки – в пассивном и активном. При работе в пассивном режиме движение полотна дорожки осуществляется за счет силы ног космонавтов, при работе в

активном режиме полотно дорожки движется за счет работы мотора. Рекомендуемая доля пассивного режима составляет 30 % от общего локомоторного объема [5, 8].

Во время локомоторных тренировок осевая нагрузка создается с помощью специального тренировочно-нагрузочного костюма (ТНК), выполняющего функцию «гравитации» и обеспечивающего давление на бегущую дорожку при тренировках космонавтов. Суммарная нагрузка от плечевых ремней и пояса, расположенного на бедрах, определяет осевую нагрузку, создаваемую космонавтом на полотно бегущей дорожки. Суммарная нагрузка между плечевыми ремнями и поясом на бедрах распределяется в соотношении 30 и 70 % соответственно. Рекомендуемая российской системой профилактики величина осевой нагрузки составляет на начальном этапе полета (1-й месяц) 60 % от массы тела, в остальное время 70 % от массы тела [5, 8].

Однако ввиду индивидуальных особенностей или личных предпочтений не все члены экипажа строго придерживаются рекомендованных бортовой документацией параметров нагрузки. Для обоснования достаточности нагрузок при локомоторных тренировках необходим индивидуальный подход к их назначению. В данной работе представлены результаты исследования совместного влияния осевой нагрузки и доли пассивного режима при локомоторных тренировках на сохранение физической работоспособности космонавтов при длительных КП. На основе проведенных исследований разработана регрессионная модель, позволяющая осуществлять индивидуальный подход к построению тренировочного процесса космонавтов на борту, обеспечивать физическую работоспособность человека, эффективный контроль и мониторинг его адаптации в условиях космической миссии.

#### Методика

В эксперименте приняли участие 20 космонавтов в возрасте от 40 лет до 51 года, выполнявших длительные экспедиции на МКС продолжительностью от 143 до 201 сут.

Профилактические мероприятия на борту Международной космической станции (МКС) для участников эксперимента планировались в соответствии с российской системой профилактики.

Индивидуальные показатели осевой нагрузки в процентах от массы тела (минимальные значения за тренировку) и доли пассивного режима от общего локомоторного объема в метрах для каждого из обследованных космонавтов представлены на рис. 1.

Эффективность профилактических мероприятий оценивалась по физиологическому ответу

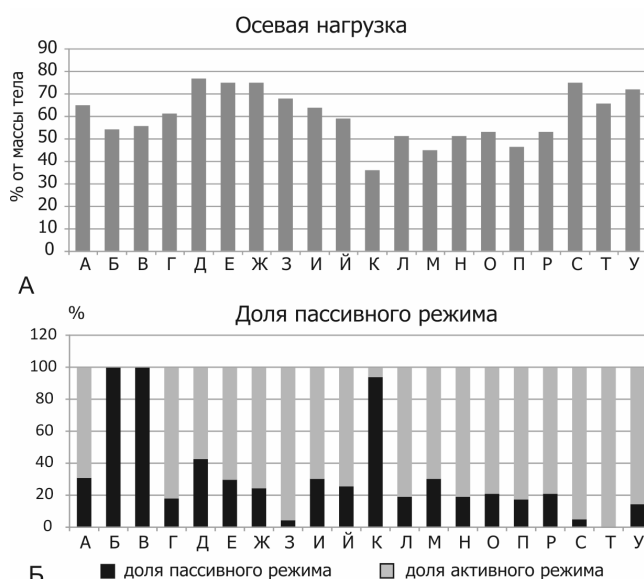


Рис. 1. Индивидуальные значения величины осевой нагрузки в процентах от массы тела и доли пассивного режима от общего локомоторного объема

организма при выполнении в ходе КП локомоторного теста МО-3. Данный тест является штатным, определяющим уровень физической работоспособности членов экипажей в российской системе медицинского обеспечения КП [5]. Тест выполнялся в пассивном режиме движения полотна бегущей дорожки и включал в себя 5 ступеней: 3 мин разминочной ходьбы, 2 мин медленного бега, 2 мин бега со средней скоростью, 1 мин бега с максимальной скоростью и 3 мин заключительной ходьбы. Тестирование проводилось за 60–30 сут до старта, 1-я полетная сессия в КП проводилась на 50–60-е сутки, 2-я – на 100–110-е сутки.

Для оценки эффективности применяемых режимов локомоторных тренировок рассматривались ступени быстрого и среднего бега как наиболее показательные. Физиологическая стоимость работы рассчитывалась как отношение изменения частоты сердечных сокращений к произведению скорости бега и величины осевой нагрузки по формуле

$$PhC = \frac{\Delta HR}{V \times Load}, \quad (1)$$

где  $PhC$  – (physiological cost) физиологическая стоимость работы;  $\Delta HR$  – (heart rate) разница частоты сердечных сокращений на ступени бега и в покое (удары в минуту);  $V$  – (velocity) среднее значение скорости на ступени быстрого и среднего бега (метры в минуту);  $Load$  – величина весовой нагрузки при выполнении штатного локомоторного теста МО-3 (проценты от массы тела).



Изменения по сравнению с фоновыми показателями вычислялись по формуле

$$W = \frac{(PhC2 - PhC1)}{PhC1} \times 100, \% \quad (2)$$

где  $PhC1$  – физиологическая стоимость нагрузки до КП;  $PhC2$  – физиологическая стоимость нагрузки после КП.

Статистическая обработка данных выполнялась в программе Statistica 10 с использованием метода регрессионного анализа. В качестве предикторов были выбраны факторы локомоторной тренировки «осевая нагрузка» (минимальные значения за тренировку) и «доля пассивного режима», в качестве зависимых переменных использовалось изменение физиологической стоимости работы в тесте МО-3 на ступени быстрого и среднего бега в 1-й и 2-й полетных сессиях.

Исследование было одобрено Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Все испытуемые в соответствии с Хельсинкской декларацией подписали Информированное согласие на участие в эксперименте.

### Результаты и обсуждение

Корреляционный анализ показал зависимость изменения физиологической стоимости нагрузки на ступени быстрого бега в 1-м полетном тестировании от факторов «осевая нагрузка» (коэффициент Пирсона составил  $r = 0,58$ ) и «доля пассивного режима» ( $r = 0,46$ ).

На основе метода множественной линейной регрессии для 1-й полетной сессии была построена модель, в которой оба фактора значимо влияют на результат тестирования (табл. 1).

Коэффициент корреляции для полученной модели составил  $r = -0,83$ , а скорректированный коэффициент детерминации, отражающий меру качества регрессионной модели, т.е. долю дисперсии зависимой переменной, объясняемой построенной моделью, составил  $r^2 = 0,64$ . Диапазон изменения предикторов здесь и в других рассматриваемых случаях составил для величины осевой нагрузки 36,2–75,0 % от массы тела, для доли пассивного режима от 0,4–100 % от общего локомоторного объема.

Степень влияния рассматриваемых предикторов определялась по величине  $\beta$ -коэффициентов, позволяющих сравнить относительный вклад каждой независимой переменной в предсказание зависимой переменной. Коэффициент влияния  $\beta$  для фактора «осевая нагрузка» был близок к данному показателю для фактора «доля пассивного режима». Таким образом, на начальном этапе полета уровень работоспособности на ступени быстрого бега примерно в одинаковой степени зависит от величины осевой нагрузки и доли пассивного режима, с которыми космонавт выполняет локомоторные тренировки.

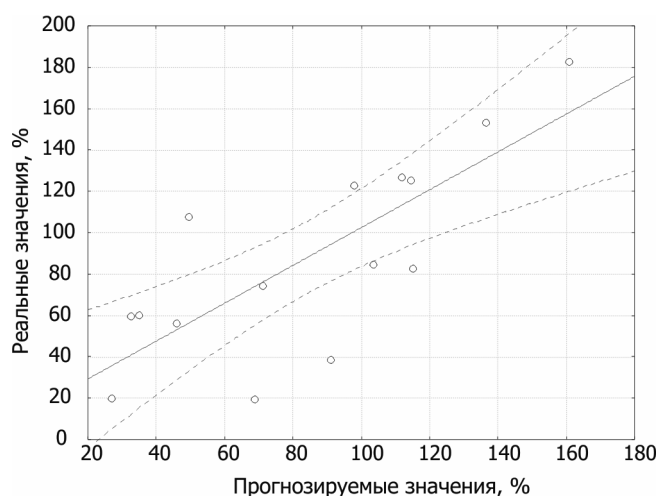


Рис. 2. Зависимость между прогнозируемыми и реальными изменениями физиологической стоимости работы на ступени быстрого бега в 1-й полетной сессии

Влияние факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима» на изменение физиологической стоимости в КП для 1-й полетной сессии выполнения теста МО-3 можно выразить следующей формулой

$$\Delta PhC_1 = 299,11 - 3,19 \times AL - 0,86 \times PM, \quad (3)$$

где  $\Delta PhC_1$  – (physiological cost) изменение физиологической стоимости работы на ступени быстрого бега в 1-й полетной сессии;  $AL$  – (axial load) осевая нагрузка в процентах от массы тела космонавта;  $PM$  – (passive mode) доля пассивного режима в процентах от общего объема локомоторной нагрузки в метрах.

Полученное уравнение позволяет предсказать изменение физиологической стоимости работы в тесте МО-3 в 1-й полетной сессии в зависимости от доли пассивного режима и осевой нагрузки, с которыми космонавт выполняет локомоторные тренировки.

Проверка достоверности полученной модели проводилась построением корреляционной зависимости между реальными и прогнозируемыми результатами,  $r = 0,83$  (рис. 2).

Для показателя «изменение физиологической стоимости» работы на ступени быстрого бега во 2-й полетной сессии коэффициенты корреляции Пирсона для предикторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима» составили 0,54 и 0,46 соответственно. Корреляционный коэффициент для полученной модели множественной регрессии составил  $r = 0,80$ , коэффициент детерминации  $r^2 = 0,58$ . Результаты полученной модели представлены в табл. 2.

Таблица 1

**Результаты регрессионного анализа факторов «осевая нагрузка», «доля пассивного режима» и изменения физиологической стоимости нагрузки в 1-й полетной сессии на ступени быстрого бега**

| Предиктор                | $\beta$ | $b$ (коэффициент) | $p$ -уровень |
|--------------------------|---------|-------------------|--------------|
| Константа                | -       | 299,11            | 0,01         |
| «Осевая нагрузка»        | -0,70   | -3,19             | 0,01         |
| «Доля пассивного режима» | -0,60   | -0,86             | 0,01         |

Таблица 2

**Результаты регрессионного анализа факторов «осевая нагрузка», «доля пассивного режима» и изменения физиологической стоимости нагрузки во 2-й полетной сессии на ступени быстрого бега**

| Предиктор                | $\beta$ | $b$ (коэффициент) | $p$ -уровень |
|--------------------------|---------|-------------------|--------------|
| Константа                | -       | 337,67            | 0,01         |
| «Осевая нагрузка»        | -0,66   | -3,48             | 0,01         |
| «Доля пассивного режима» | -0,60   | -1,01             | 0,01         |

Таблица 3

**Результаты регрессионного анализа факторов «осевая нагрузка», «доля пассивного режима» и изменения физиологической стоимости нагрузки в 1-й полетной сессии на ступени среднего бега**

| Предиктор                | $\beta$ | $b$ (коэффициент) | $p$ -уровень |
|--------------------------|---------|-------------------|--------------|
| Константа                | -       | 356,07            | 0,01         |
| «Осевая нагрузка»        | -0,63   | -3,73             | 0,01         |
| «Доля пассивного режима» | -0,69   | -1,26             | 0,01         |

Таблица 4

**Результаты регрессионного анализа факторов «осевая нагрузка», «доля пассивного режима» и изменения физиологической стоимости нагрузки во 2-й полетной сессии на ступени среднего бега**

| Предиктор                | $\beta$ | $b$ (коэффициент) | $p$ -уровень |
|--------------------------|---------|-------------------|--------------|
| Константа                | -       | 293,15            | 0,01         |
| «Осевая нагрузка»        | -0,64   | -2,98             | 0,01         |
| «Доля пассивного режима» | -0,62   | -0,90             | 0,01         |

В данном случае коэффициенты влияния  $\beta$  рассматриваемых предикторов близки между собой.

Совместное влияние 2 факторов описывается формулой

$$\Delta PhC_2 = 337,67 - 3,48 \times AL - 1,01 \times PM, \quad (4)$$

Корреляционная зависимость между реальными и прогнозируемыми результатами составила  $r = 0,80$  (рис. 3).

Построенные регрессионные модели изменения физиологической стоимости нагрузки для 1-й и 2-й половины КП на ступени быстрого бега имели схожие параметры. Однако в 1-й половине КП осевая нагрузка являлась несколько более значимым фактором, влияющим на изменение физиологической

стоимости нагрузки при выполнении быстрого бега на ступени МО-3.

На ступени среднего бега в 1-й полетной сессии корреляционный коэффициент Пирсона, иллюстрирующий зависимость изменения физиологической стоимости нагрузки от факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима», составил  $r = -0,50$  и  $r = -0,56$  соответственно.

В модели, построенной для ступени среднего бега в 1-й полетной сессии, оба фактора значимо влияли на результат тестирования, при этом коэффициент корреляции для полученной модели составил  $r = 0,84$ , а коэффициент детерминации –  $r^2 = 0,66$  (табл. 3).

Степень вклада факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима», оценивалась по регрессионным коэффициентам  $\beta$ .

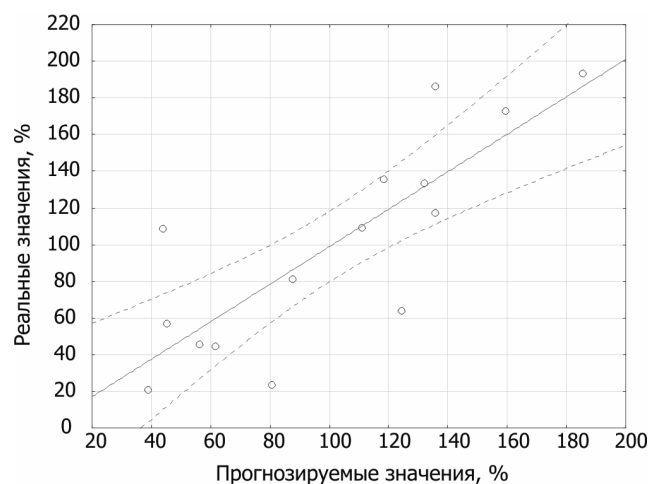


Рис. 3. Зависимость между прогнозируемыми и реальными изменениями физиологической стоимости работы на ступени быстрого бега во 2-й полетной сессии

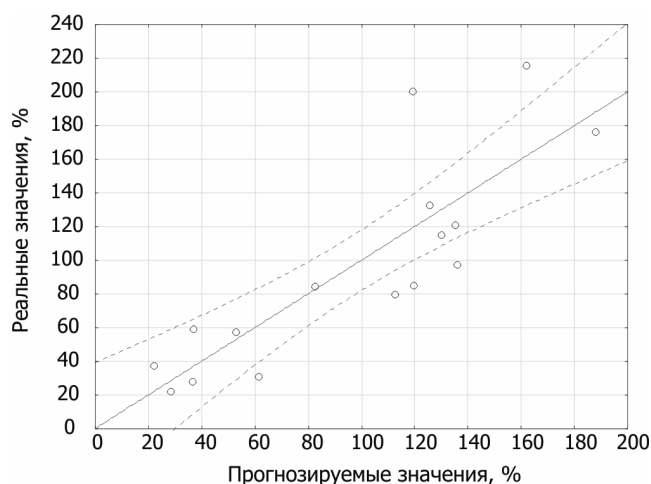


Рис. 4. Зависимость между прогнозируемыми и реальными изменениями физиологической стоимости работы на ступени среднего бега в 1-й полетной сессии

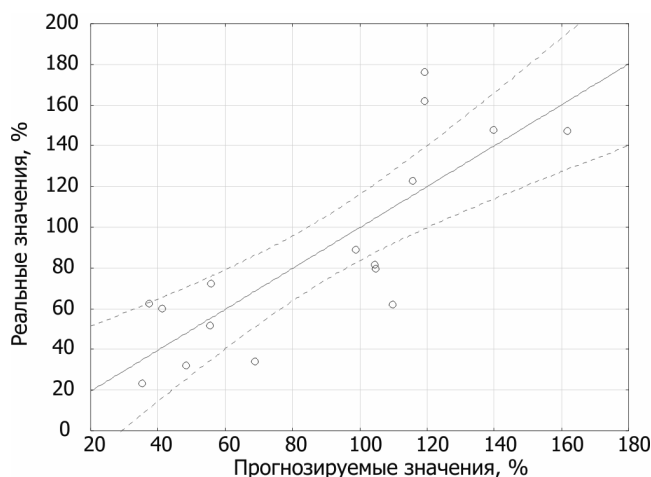


Рис. 5. Зависимость между прогнозируемыми и реальными изменениями физиологической стоимости работы на ступени среднего бега во 2-й полетной сессии

Совместное влияние факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима» на изменение физиологической стоимости в КП на ступени среднего бега для 1-й полетной сессии выполнения теста МО-3 можно выразить следующей формулой

$$\Delta PhC_1 = 356,07 - 3,73 \times AL - 1,2 \times PM, \quad (5)$$

Корреляционная зависимость между реальным и прогнозируемым изменением физиологической стоимости работы составила  $r = 0,84$  (рис. 4).

Полученные результаты свидетельствуют об обратной зависимости изменения физиологической стоимости работы на ступени среднего бега в 1-й полетной сессии от факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима».

Коэффициенты корреляции Пирсона во 2-й полетной сессии на ступени среднего бега для предикторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима» составили  $r = -0,52$  и  $r = -0,49$  соответственно. Коэффициент корреляции для полученной модели множественной регрессии был равен  $r = -0,80$ , коэффициент детерминации  $r^2 = 0,59$ . Основные параметры построенной модели представлены в табл. 4.

В данной модели коэффициенты влияния  $\beta$  очень близки по значению.

Совместное влияние 2 факторов можно описать формулой

$$\Delta PhC_2 = 293,15 - 2,98 \times AL - 0,90 \times PM, \quad (6)$$

Коэффициент корреляции между реальным и прогнозируемым изменением физиологической стоимости работы составил  $r = 0,80$  (рис. 5).

Таким образом, построенные регрессионные модели изменения физиологической стоимости нагрузки на ступени среднего бега в тесте МО-3 для 1-й и 2-й половины КП имели схожие параметры, при этом оба фактора оказывали практически равнозначное влияние на сохранение физической работоспособности на протяжении всего полета.

В работе использован новый подход к построению системы профилактики, базирующийся на определении совместного влияния факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима», методом множественного линейного регрессионного анализа на основе модели изменения физической работоспособности в КП и после его завершения. Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение физиологической стоимости работы по сравнению с предполетным уровнем в КП имеет обратную зависимость от осевой нагрузки и доли пассивного режима, используемых космонавтами в локомоторных тренировках на борту МКС, а при их правильном сочетании снижение физиологической стоимости в полете минимально по сравнению с фоновым тестированием.

Метод линейной регрессии широко применяется в спортивной физиологии и медицине для определения наиболее значимых критериев, прогнозирования результатов в спорте высших достижений [9, 10] и индивидуального подхода [11]. Построенные в нашем исследовании модели имеют достаточно высокий скорректированный коэффициент детерминации  $r^2$  (0,59–0,66), т.е. описывают 59–66 % выборки, что свидетельствует об их достаточной надежности. Примерно равнозначный коэффициент  $\beta$  во всех построенных нами моделях для факторов «осевая нагрузка» и «доля пассивного режима» свидетельствует о близком влиянии вышеуказанных факторов на изменение физической работоспособности в КП на ступенях среднего и быстрого бега в 1-й и 2-й полетных сессиях.

Ранее была показана независимая эффективность рассматриваемых факторов в сохранении уровня физической работоспособности российских членов экипажа. У группы космонавтов, выполнявших локомоторные тренировки с долей пассивного режима более 27 % от общего локомоторного объема, физиологическая стоимость нагрузки в тесте МО-3 была ниже по сравнению с группой космонавтов, использовавших в локомоторных тренировках менее 24 % пассивного режима [12]. Из данных литературы известно, что локомоторные тренировки европейских и американских членов экипажей выполняются в активном и пассивном режимах работы полотна бегущей дорожки [13, 14]. Однако в доступных источниках литературы информация о рекомендованном процентном соотношении пассивного и активного режимов работы полотна бегущей дорожки в тренировке отсутствует.

Эффект от использования пассивного режима работы полотна бегущей дорожки может быть вызван особенностью выполнения локомоций в данном режиме. При выполнении локомоций в пассивном режиме необходимо управлять скоростью дорожки с помощью проталкивания полотна назад, что является частью цикла шага. Объем выполненной работы складывается из преодоления осевой нагрузки, создаваемой ТНК, и силы сопротивления полотна дорожки [15]. При использовании пассивного режима на бегущей дорожке TVIS сопротивление скольжения полотна в среднем составляет 5,16 кг [15], а осевая нагрузка, создаваемая при выполнении локомоций в пассивном режиме, практически постоянна и не зависит от скорости локомоций [16]. В эксперименте, проведенном в параболетических полетах, при выполнении локомоций на бегущей дорожке БД-1, имеющей только пассивный режим работы полотна, величина осевой нагрузки составляла примерно 520 Н [16]. Таким образом, при выполнении локомоций в пассивном режиме работы полотна бегущей дорожки создается дополнительная нагрузка, способствующая увеличению

метаболического ответа и соответственно тренировочного эффекта по сравнению с тренировками в активном режиме [15].

В работе [17] показано, что у группы космонавтов, выполнявших локомоторные тренировки с величиной осевой нагрузки более 64 % от массы тела, физиологическая стоимость нагрузки в тесте МО-3 во время КП была ниже по сравнению с группой космонавтов, выполнявших локомоторные тренировки с величиной осевой нагрузки менее 61 % от массы тела. Стоит также отметить, что у американских членов экипажей длительных экспедиций на МКС рекомендуемая величина осевой нагрузки находится в пределах от 60 % от массы тела в начале полета с постепенным увеличением до 100 %. Однако максимальная величина данного параметра не превышает 85 % от массы тела [13, 17]. В соответствии с рекомендациями для европейских членов экипажей осевая нагрузка при выполнении локомоторных тренировок не должна быть менее 60 % от массы тела [13, 14]. Положительный эффект, вызванный использованием большей величины осевой нагрузки во время выполнения локомоторных тренировок в условиях невесомости, может быть вызван увеличением силы, необходимой для преодоления осевой нагрузки во время отталкивания от беговой дорожки при выполнении локомоций [18]. При этом стоит отметить, что увеличение осевой нагрузки до 100 % от массы тела на настоящий момент не представляется возможным, из-за сильного дискомфорта при использовании костюмов осевого нагружения [13, 17, 19].

Таким образом, мы предполагаем, что с увеличением осевой нагрузки и доли пассивного режима работы полотна бегущей дорожки происходит увеличение суммарной работы, что, в свою очередь, приводит к увеличению эффективности локомоторных тренировок в профилактике негативных эффектов невесомости. На основе построенной регрессионной модели появилась возможность дозировать использование данных факторов в локомоторной тренировке.

Необходимо отметить, что положительный эффект влияния факторов «доля пассивного режима» и «осевая нагрузка» может обуславливаться увеличением опорной афферентации, играющей важную роль в сохранении активности моторного контроля [3, 5, 8, 20].

### Выводы

Разработана регрессионная модель, описывающая влияние факторов «осевая нагрузка», «доля пассивного режима» на физическую работоспособность космонавтов при локомоторных тренировках. Данная модель позволит осуществить индивидуальный подход к построению тренировочного процесса



для космонавта на борту, эффективный контроль и мониторинг его адаптации к условиям длительного полета.

Работа поддержана программой фундаментальных исследований президиума РАН «Фундаментальные исследования для биомедицинских технологий», направление исследований 0314-2018-0001.

#### Список литературы

1. Moore A.D., Downs M.E., Lee S.M. et al. Peak exercise oxygen uptake during and following longduration spaceflight // J. Appl. Physiol. 2014. V. 117. № 3. P. 231–238.
2. Fitts R.H., Colloton P.A., Trappe S.W. et al. Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles // Ibid. 2013. V. 115. № 5. P. 667–679.
3. Козловская И.Б. Гравитация и позно-тоническая двигательная система // Авиакосм. и экол. мед. 2017. Т. 51. № 3. С. 5–21.
4. Kozlovskaja I.B. Gravitation and postural-tonic motor system // Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina. 2017. V. 51. № 3. P. 5–21.
5. Козловская И.Б., Пестов И.Д., Егоров А.Д. Система профилактики в длительных космических полетах // Там же. 2008. Т. 42. № 6. С. 66–73.
6. Kozlovskaya I.B. Pestov I.D., Egorov A.D. System of countermeasure in long duration space flights // Ibid. 2008. V. 42. № 6. P. 66–73.
7. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю., Чернова М.В. и др. Сравнительный анализ профилактической эффективности различных режимов локомоторных тренировок в условиях космического полета // Физиология человека. 2016. Т. 42. № 5. С. 84–91.
8. Fomina E.V., Lysova N.Yu., Chernova M.V. et al. Comparative analysis of preventive efficacy of different modes of locomotor training in space flight // Fiziologiya cheloveka. 2016. V. 42. № 5. P. 84–91.
9. Степанцов В.И., Тихонов М.А., Еремин А.В. Физическая тренировка как метод предупреждения гиподинамического синдрома // Косм. биология и авиакосм. мед. 1972. Т. 6. № 4. С. 64–68.
10. Stepantsov V.I., Tikhonov M.A., Eremin A.V. Physical training as a method preventive hypodynamic syndrome // Kosmicheskaya biologiya i aviakosmicheskaya meditsina. 1972. V. 6. № 4. P. 64–68.
11. Какурин Л.И., Черепяхин М.А., Первушин В.Н. Влияние факторов космического полета на мышечный тонус у человека // Там же. 1971. Т. 5. № 2. С. 63–68.
12. Kakurin L.I., Cherepahin M.A., Pervushin V.N. The effect of space flight factors on muscle tone in humans // Ibid. 1971. V. 5. № 2. P. 63–68.
13. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю., Савинкина А.О. Осевая нагрузка при выполнении локомоторных тренировок в условиях невесомости как фактор эффективности профилактики гипогравитационных нарушений // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 1. С. 56–63.
14. Fomina E.V., Lysova N.Yu., Savinkina A.O. Axial load during performing locomotor training in microgravity as a factor of hypogravity countermeasure efficiency // Fiziologiya cheloveka. 2018. V. 44. № 1. P. 56–63.
15. Кутек Т.Б., Ахметов Р.Ф., Шаверский В.К. Особенности управления подготовкой квалифицированных спортсменов // Физическое воспитание и спорт в контексте государственной 106 программы развития физической культуры на Украине: опыт, проблемы, перспективы. Житомир, 2015. С. 29–39.
16. Kutek T.B., Akhmetov R.F., Shaverskiy V.K. Features of the management of the training of qualified athletes // Fizicheskoe vospitanie i sport v kontekste gosudarstvennoy 106 programmy razvitiya fizicheskoy kul'tury na Ukraine: opyt, problemy, perspektivy. Zhitomir, 2015. P. 29–39.
17. Попов Д.В., Бравый Я.Р., Мисина С.С. и др. Прогнозирование спортивного результата у конькобежцев по данным комплексного морфофизиологического обследования // Медико-биологические технологии повышения работоспособности в условиях напряженных физических нагрузок: Сб. статей. М., 2007. Вып. 3. С. 41–64.
18. Popov D.V., Bravy Ya.R., Missina S.S. et al. Forecasting the athletic performance of skaters according to the data of the complex morphophysiological survey // Mediko-biologicheskie tekhnologii povysheniya rabotosposobnosti v usloviyakh napryazhennykh fizicheskikh nagruzok. Sbornik statey. Moscow, 2007. Is. 3. P. 41–64.
19. Козина Ж.Л., Гринь Л.В., Ефимов А.А. Применение системы направлений, средств и методов индивидуализации подготовки спортсменов в игровых видах спорта в структурных элементах годичного цикла подготовки // Физическое воспитание студентов. 2010. № 4. С. 45–52.
20. Kozina Zh.L., Grin' L.V., Efimov A.A. Application of the system of directions, means and methods of individualizing the training of athletes in game sports in the structural elements of the annual cycle of training // Fizicheskoe vospitanie studentov. 2010. № 4. P. 45–52.
21. Фомина Е.В., Лысова Н.Ю., Кукоба Т.Б. Ways to optimize the joint action of locomotion and resistance training in extended missions with allowance for individual profiles of cosmonauts // 65th International Astronautical Congress (IAC 2014). 2014. P. 68.
22. Fomina E.V., Lysova N.Yu., Kukoba T.B. Ways to optimize the joint action of locomotion and resistance training in extended missions with allowance for individual profiles of cosmonauts // 65th International Astronautical Congress (IAC 2014). 2014. P. 68.
23. Лоehr J.A., Guilliams M.E., Petersen N. et al. Physical training for long-duration spaceflight // Aerosp. Med. Hum. Perform. 2015. V. 86. № 12. P. 14–23.
24. Petersen N., Jaekel P., Rosenberger A. et al. Exercise in space: the European Space Agency approach to in-flight exercise countermeasures for long-duration missions on ISS. // Extrem. Physiol. Med. V. 5. P. 9.
25. Lee S.M.C., De Witt J.K., Smith C. et al. Physiologic responses and biomechanical aspects of motorized and non-motorized treadmill exercise: A ground-based evaluation of treadmills for use on the International Space Station.

National Aeronautics and Space Administration Technical Report 20060052414. 2006.

16. DeWitt J., Schaffner G., Bentley J. et al. Biomechanical evaluation of locomotion on the Russian BD-1 treadmill in a weightless environment (KC-135). [Electronic resource]. NASA/TM-2006-213718.

17. Laughlin M.S., Williams M.E., Nieschwitz B.A. et al. Functional fitness testing results following long-duration ISS missions // *Aerosp. Med. Hum. Perform.* 2015. V. 86. № 12. P. 87–91.

18. De Witt J.K., Schaffner G., Ploutz-Snyder L.L. Bungee force level, stiffness, and variation during treadmill locomotion in simulated microgravity // *Aviat. Space Environ. Med.* 2014. V. 85. № 4. P. 449–455.

19. Novotny S.C., Perusek G.P., Rice A.J. et al. A harness for enhanced comfort and loading during treadmill exercise in space // *Acta Astronaut.* 2013. V. 89. P. 77–95.

20. DeWitt J.K., Ploutz-Snyder L.L. Ground reaction forces during treadmill running in microgravity // *J. of Biomech.* 2014. V. 47. № 10. P. 2339–2347.

Поступила 23.01.2018

## **REGRESSION MODEL AS A CORE OF THE INDIVIDUAL APPROACH TO BUILDING THE SYSTEM OF COUNTERMEASURES TO THE ADVERSE EFFECTS OF MICROGRAVITY**

**Fomina E.V., Lysova N.Yu.**

*Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina* (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 16–23

*The Russian system of countermeasures to the adverse effects of microgravity proceeds from 3 pillars of the locomotion physical training, i.e. an interval or continuous method, passive portion in the total dose of locomotions and axial loading in percent to the body mass. However, not all crewmembers adhere to the load prescriptions. The paper introduces a new approach to the countermeasures system, i.e. estimation of the synergy of axial loading and passive training using the multiple linear regression analysis of changes in physical performance in and post space mission.*

**Key words:** microgravity, locomotion training, axial loading, physical performance.

УДК 613.693+331.43/.45

## РЕЖИМ ТРУДА И ОТДЫХА РОССИЙСКОГО КОСМОНАВТА В 340-СУТОЧНОМ ПОЛЕТЕ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Степанова С.И., Карпова О.И., Нестеров В.Ф., Галичий В.А., Королёва М.В.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: ssi@imbp.ru

*Рассмотрены особенности режима труда и отдыха российского участника 340-суточного орбитального полета в 2015–2016 гг. Показано, что рабочая нагрузка космонавта распределялась в ходе полета неравномерно. Наибольшей она была в период с середины июня до конца августа 2015 г. и в период с середины декабря 2015 г. до завершения полета. Оба периода были отмечены сверхнормативными рабочими нагрузками, еженедельный объем которых варьировал в пределах от 42 мин до 2 ч 13 мин (от 6 мин до 19 мин в сут). Суммарная длительность периодов, отмеченных избыточными рабочими нагрузками, составила примерно половину общей длительности полета. В остальном рабочая нагрузка была ниже нормативного лимита. Сон космонавта в 92 % случаев планировался в соответствии со штатными требованиями (ежесуточная продолжительность сна 8,5 ч, с 21 ч 30 мин до 6 ч утра по Гринвичу). В 8 % случаев допускались отклонения от штатного распорядка в связи с необходимостью частичного или полного смещения рабочего периода на ночное время. Сдвиги сна совершались как по часовой стрелке, так и против, величина сдвига варьировала от 30 мин до 11 ч.*

*В связи с перспективами увеличения длительности космических экспедиций до 1 года и больше подчеркивается необходимость распределения рабочих нагрузок членов экипажей с учетом сезонной периодичности жизненных функций организма.*

**Ключевые слова:** 340-суточный полет, режим труда и отдыха, сверхнормативная работа, нормативный лимит рабочей нагрузки, плановый период сна, сезонная периодичность жизненных функций организма.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 24–28.

**DOI:** 10.21687/0233-528X-2018-52-2-24-28

По программе Международной космической станции (МКС) в период с 28.03.2015 по 02.03.2016 был выполнен 340-суточный полет российского космонавта и американского астронавта. В истории астронавтики США это был первый опыт осуществления космической экспедиции окологодовой продолжительности. Советские и российские космонавты ранее уже совершали полеты длительностью более 1 года. Первым из них был врач-космонавт

В.В. Поляков, выполнивший 437-суточный полет в составе 15–17-й экспедиций на орбитальном комплексе (ОК) «Мир» (с 10.01.1994 по 22.03.1995). Вторым был космонавт С.В. Авдеев – участник 26-й и 27-й экспедиций на ОК «Мир». Общее время его непрерывного пребывания в космосе составило 379 сут (с 15.08.1998 по 28.08.1999).

Полеты такой длительности совершаются в целях развития фундаментальных наук о жизни (гравитационной физиологии и биологии), расширения и углубления знаний, навыков и умений в области космической медицины и космической психологии, а также в интересах решения перспективных проблем пилотируемой космонавтики, прежде всего – осуществления длительных межпланетных экспедиций, освоения Луны и Марса. В этой связи важнейшей задачей исследований в сфере медицинского обеспечения космических полетов (КП) является повышение эффективности мероприятий по сохранению здоровья и работоспособности членов экипажей.

Целью данной работы является анализ особенностей режима труда и отдыха (РТО) российского участника 340-суточного полета, направленный на совершенствование подходов к оптимизации РТО участников будущих межпланетных экспедиций.

Следует отметить, что российский космонавт, совершивший 340-суточный полет, уже имел опыт КП. В первый раз он летал в качестве бортинженера-3 (БИ-3) 22/23-й и 23/24-й экспедиций на МКС. Общая продолжительность полета составила 176 сут (с 02.04.2010 по 25.09.2010). 340-суточный полет был его вторым полетом, на всем протяжении которого российский космонавт выполнял функции БИ-2.

Учитывая, что в 340-суточном полете состав экипажа менялся несколько раз, этот полет можно условно разделить на 7 этапов (табл. 1).

### Методика

В основу исследования были положены еженедельные заключения экспертов по РТО Московского центра управления полетами, содержащие информацию об особенностях РТО членов экипажа на протяжении каждой очередной недели, в том числе

Таблица 1

**Организационные особенности 340-суточного полета**

| Этапы полета (№ п/п) | Экспедиции МКС | Даты начала и окончания этапов | Продолжительность этапов (сут) | Количество российских членов экипажа |
|----------------------|----------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1                    | 42/43          | 28.03.2015 – 09.06.2015        | 74                             | 3                                    |
| 2                    | 43             | 10.06.2015 – 21.07.2015        | 42                             | 2                                    |
| 3                    | 43/44          | 22.07.2015 – 01.09.2015        | 42                             | 3                                    |
| 4                    | 43/44/45       | 02.09.2015 – 15.09.2015        | 14                             | 4                                    |
| 5                    | 44/45          | 16.09.2015 – 11.12.2015        | 87                             | 3                                    |
| 6                    | 45             | 12.12.2015 – 15.12.2015        | 4                              | 2                                    |
| 7                    | 45/46          | 16.12.2015 – 02.03.2016        | 77                             | 3                                    |

Таблица 2

**Сверхнормативные работы в полетах МКС 26/27–39/40**

| Экспедиции МКС              | Еженедельная сверхнормативная нагрузка 1 космонавта (в среднем за полет) | Ежедневная сверхнормативная нагрузка 1 космонавта (в среднем за полет) |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 26/27                       | 7 ч 20 мин                                                               | 1 ч 03 мин                                                             |
| 27/28                       | 1 ч 52 мин                                                               | 16 мин                                                                 |
| 29/30                       | 6 ч 17 мин                                                               | 54 мин                                                                 |
| 30/31                       | 1 ч 10 мин                                                               | 10 мин                                                                 |
| 31/32                       | 1 ч 16 мин                                                               | 11 мин                                                                 |
| 32/33                       | 1 ч 47 мин                                                               | 15 мин                                                                 |
| 33/34                       | 10 мин                                                                   | 1,5 мин                                                                |
| 34/35                       | 3 ч 21 мин                                                               | 29 мин                                                                 |
| 35/36                       | 5 ч 42 мин                                                               | 49 мин                                                                 |
| 36/37                       | 4 ч 47 мин                                                               | 41 мин                                                                 |
| 37/38                       | 1 ч 46 мин                                                               | 15 мин                                                                 |
| 38/39                       | 6 ч 49 мин                                                               | 58 мин                                                                 |
| 39/40                       | 4 ч 03 мин                                                               | 35 мин                                                                 |
| В среднем по группе полетов | 3 ч 36 мин                                                               | 31 мин                                                                 |

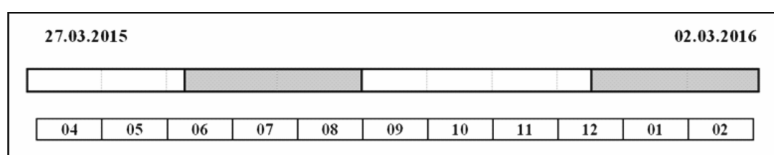


Рис. 1. Распределение рабочей нагрузки БИ-2 в ходе 340-суточного полета.

Здесь и на рис. 2: серым цветом обозначены периоды, отмеченные сверхнормативными рабочими нагрузками, белым цветом – периоды, отмеченные рабочими нагрузками ниже нормативного предела. Вверху – даты начала и окончания полета. Внизу – календарные месяцы

данные о плановой и дополнительной (сверхплановой) рабочей нагрузке (в единицах времени) и распорядке сна космонавтов. Применительно к каждой

полетной неделе рассчитывали суммарный объем плановой и сверхплановой работы, выполненной БИ-2. Из этого показателя вычитали 34,5 ч, что соответствует нормативному пределу еженедельной рабочей нагрузки, и получали величину сверхнормативной работы, выполненной БИ-2 на протяжении недели.

Рассматривая особенности распорядка сна, использовали плановые показатели, относящиеся не только к БИ-2, но и к другим его партнерам по полету, поскольку сон планировался для российской части экипажа в целом. Получение данных о

фактическом распорядке сна БИ-2 (так же как и других космонавтов) процедурой мониторинга РТО не предусматривалось.



## Результаты и обсуждение

Согласно полученным данным (рис. 1), рабочая нагрузка распределялась в процессе полета неравномерно. Наибольшей она была на 2-м и 3-м этапах полета (в период примерно с середины июня до конца августа 2015 г.) и на 7-м, завершающем, этапе (начиная с середины декабря 2015 г. и до конца полета). Суммарная длительность указанных этапов составила около половины общей продолжительности полета. Все 3 этапа были отмечены сверхнормативными рабочими нагрузками, еженедельный объем которых варьировал от 42 мин до 2 ч 13 мин (от 6 до 19 мин в сут). Сравнивая эти показатели с соответствующими данными предыдущих полетов (табл. 2), можно понять, что избыточные нагрузки БИ-2 в 340-суточном полете находились на сравнительно низком уровне, далеко от столь высоких значений, какие отмечались в экспедициях 26/27, 29/30, 35/36, 36/37 и 38/39.

Причинами сверхнормативных работ, выполнявшихся российским космонавтом в 340-суточном полете, были:

- Task List;
- видеосъемки в интерьере станции;
- погрузка и разгрузка грузовых кораблей;
- нештатные ситуации и сопутствующие ремонтно-восстановительные работы.

В остальном рабочая нагрузка БИ-2 была ниже нормативного лимита.

Результаты анализа особенностей сна показали, что в 92 % случаев плановый период сна соответствовал штатным требованиям (ежесуточная продолжительность сна 8,5 ч, с 21 ч 30 мин до 6 ч утра по Гринвичу). В 8 % случаев сон планировался с отклонениями от штатного распорядка. Это объяснялось необходимостью частичного или полного смещения рабочего периода на ночное время (т.е. на штатный период сна). Сдвиги сна совершались как по часовой стрелке, так и против, величина сдвига варьировала от 30 мин до 11 ч.

Плановые отклонения совершались по поводу следующих событий:

- прием транспортных пилотируемых кораблей (ТПК) с прибытием на станцию 43, 44 и 45-й экспедиций;
- завершение 42, 43, 44 и 45-й экспедиций (отстыковка от станции и посадка ТПК);
- прием транспортных грузовых кораблей (ТГК);
- внекорабельная деятельность (ВКД);
- перестыковка ТПК с одного модуля на другой;
- TV-сеанс с премьер-министром РФ;

Важно, что после ночной работы космонавтам планировали время на последующий сон и отдых. Этот период включал от 16 до 30 ч. Кроме того

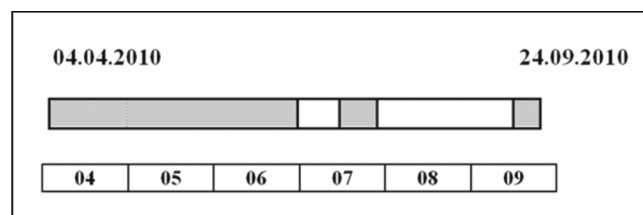


Рис. 2. Распределение рабочей нагрузки БИ-3 в ходе 176-суточного полета

перед ночной работой планировался дневной сон длительностью 4–5 ч. В итоге плановая продолжительность сна, отмеченного отклонениями от штатного графика, составляла в среднем 12 ч 05 мин.

Во время послеполетной встречи с наземными специалистами БИ-2 отметил, что отклонения от штатного распорядка сна создавали некоторое напряжение. Но в таких случаях членам экипажа предоставляли дополнительное время для отдыха и сна, поэтому, по словам БИ-2, «...в целом все было в пределах нормы... Продолжительность сна в среднем была 7 часов, в дни отдыха немного побольше... В том, что касается здоровья, – заключил он, – в сравнении с прежним полетом я прилетел в лучшем состоянии. Несмотря на все трудности, я чувствую себя совершенно нормально».

Напомним, что прежний полет российского участника 340-суточной экспедиции продолжался 176 сут. Тем не менее самочувствие космонавта после него оказалось хуже, чем после второго, более длительного, полета. Предположим, что первый полет, несмотря на его сравнительную краткость, был более утомительным: возможно, рабочие нагрузки были выше, а распорядок сна – хуже. Для проверки этого предположения был выполнен анализ РТО этого космонавта в 176-суточной экспедиции в составе экипажей МКС 22/23 и 23/24 (здесь он летал в качестве БИ-3).

Как следует из рис. 2, 176-суточный полет тоже был отмечен чередованием периодов сверхнормативной нагрузки и менее напряженной работы на уровне ниже нормативного лимита.

Суммарная продолжительность сверхнормативной работы составила 3,8 мес, или 65 % общей длительности полета. Еженедельный объем сверхнормативной нагрузки варьировал в пределах от 55 мин до 19 ч 35 мин (последняя величина относится к 9-й неделе полета – погрузочно-разгрузочные работы без дней отдыха), или от 8 мин до 2 ч 48 мин в сут. Сравнивая эти показатели с приведенными выше данными 340-суточного полета, нетрудно видеть, что предельная величина сверхнормативной нагрузки в 176-суточном полете была намного выше, чем в 340-суточном. Общий объем сверхнормативной работы в 176-суточном полете составил 70 ч 35 мин, а в 340-суточном – в 2,5 раза

меньше (28 ч 03 мин). Расчетная величина сверхнормативной нагрузки в среднем за каждые сутки полета в 340-суточном полете составила 5 мин, а в 176-суточном полете – 24 мин.

Возможно, и в самом деле в своем первом полете космонавт устал больше, чем во втором, и это негативно отразилось на его самочувствии. Кроме того, нужно учитывать, что первый полет – это дорога в неизведанное, с которой наш организм на всех его уровнях – как соматическом, так и психическом – справляется труднее, чем с движением по проторенному пути, и это может плохо влиять на самочувствие, в том числе на качество сна. К сожалению, мы располагаем данными только о плановом расписании сна, который в обоих полетах мало различался. Между прочим, психологически несовместимый (или трудно совместимый) партнер по экипажу тоже может быть источником психического напряжения. Находиться в тесном контакте с таким человеком – прямая дорога к депрессии и к конфликтам с сопутствующими расстройствами в виде повышенной утомляемости, ухудшения сна, настроения, вегетативных нарушений невротического характера. Была ли такая проблема у нашего космонавта в его полетах (или, может быть, в одном из них), ничего определенного сказать нельзя.

Хотелось бы обратить внимание на то, что рациональное распределение рабочих нагрузок на протяжении многомесячных периодов должно отражать естественную эндогенную (внутренне присущую) периодичность жизненных функций организма. В контрастные сезоны года – зимой и летом – организм функционирует в более устойчивом режиме, нежели в промежутках между ними. Весной и осенью организм испытывает состояние так называемого сезонного физиологического десинхроноза, отмеченное некоторой разбалансированностью физиологических процессов, обострением ряда хронических заболеваний и снижением работоспособности. С этой точки зрения понятно, что в весенние и осенние месяцы рабочие нагрузки следует снижать, а зимой и летом их можно поддерживать на более высоком уровне. Именно такая картина была характерна для 340-суточной экспедиции, где периоды сверхнормативной работы приходились на июнь – август и декабрь – февраль, а весной и осенью нагрузки падали ниже нормативного лимита. Это произошло непреднамеренно, но оказалось весьма кстати. Что же касается 176-суточного полета, то здесь периоды высоких рабочих нагрузок включали апрель – май и часть сентября, т.е. время, когда нагрузки должны снижаться. Учитывая все это, можно предположить, что 340-суточный полет имел биоритмологическое преимущество перед 176-суточным полетом благодаря согласованности режима рабочих нагрузок с сезонными колебаниями физиологических возможностей организма и его

работоспособности. Не исключено, что это обстоятельство положительно сказалось на самочувствии космонавта после второго полета.

В дальнейшем при осуществлении космических экспедиций длительностью до 1 года и более нужно будет распределять ежемесячную рабочую нагрузку членов экипажей с учетом сезонной ритмики организма.

#### Выводы

1. В процессе 340-суточного полета российского космонавта периоды, отмеченные сверхнормативной работой, чередовались с периодами сниженных рабочих нагрузок, не достигающих нормативного лимита. Суммарная длительность эпизодов сверхнормативной работы составила около половины общей длительности полета. Суточный объем сверхнормативных работ варьировал от 6 мин до 19 мин.

2. Плановые характеристики периода сна (продолжительность, моменты начала и окончания) в 92 % случаев соответствовали штатным требованиям. В 8 % случаев сон планировался с отклонениями от штатного расписания в связи с необходимостью частичного или полного смещения рабочего периода на ночное время.

3. При осуществлении космических экспедиций длительностью до 1 года и более необходимо распределять ежемесячную рабочую нагрузку членов экипажей с учетом сезонной периодичности жизненных функций организма.

*Работа выполнена в соответствии с темой СЧ ОКР «МКС» (ИМБП).*

Поступила 08.09.2017

#### WORK AND REST CYCLE OF THE RUSSIAN COSMONAUT IN THE 340-DAY MISSION ON THE INTERNATIONAL SPACE STATION

**Stepanova S.I., Karpova O.I., Nesterov V.F., Galichiy V.A., Koroleva M.V.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 24–28

*Scrutiny of the work and rest cycle of the Russian participant in the 340-d ISS mission in 2015–2016 showed that workload was uneven in the course of the mission being hard in the period between mid-June and end of August of 2015 and then beginning in mid-December of 2016 till the*

*mission completion. In both periods, the weekly overwork varied in the interval from 42 min to 2 h 13 min (6 to 19 min of overwork per a day). Total time of overwork constituted approximately half the mission length. Otherwise the workload was below the standard limit. 92 % of the night sleep time was planned according to the regulations, i.e. 8.5 h from 09.30 p.m. till 06.00 a.m. Greenwich Time. In 8 % of nights the sleep was shifted slightly or replaced fully by*

*work. Sleep shifting was both clockwise and counterclockwise and varied from 30 min to 11 hours.*

*Extension of space missions to a year and longer will dictate workload management with consideration of seasonal changes in the vital body functions.*

*Key words: 340-day mission, work and rest cycle, overwork, standard workload, planned sleep time, seasonal changes in the vital body functions.*

УДК 629.786.2:614.876

## ОЦЕНКИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗ КОСМОНАВТОВ ПО ПОКАЗАНИЯМ БОРТОВЫХ ДОЗИМЕТРОВ

Митрикас В.Г., Хорошева Е.Г.

Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

E-mail: vg\_mit@imbp.ru

*При контроле радиационной нагрузки на космонавтов возникает необходимость оценивать индивидуальные поглощенные дозы с учетом их пребывания в различных отсеках космического аппарата, которые имеют различную защищенность. В работе рассмотрена методика оценки таких доз по показаниям бортовых дозиметров – датчиков Пилле. Показано, что достаточно простым способом можно определить, носил ли космонавт постоянно индивидуальный дозиметр. В очередной раз показана необходимость установки дополнительной противорадиационной защиты в каютах служебного модуля.*

Ключевые слова: космическая ионизирующая радиация, эффективные дозы, коэффициент качества.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 29–33.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-29-33

Одной из задач индивидуального дозиметрического контроля является измерение доз облучения космонавтов с целью их сопоставления с нормативными уровнями радиационного воздействия и проведения при необходимости соответствующих лечебно-профилактических мероприятий. Согласно действующим нормативам [1], основными контролируемыми параметрами радиационного воздействия являются:

- эффективная доза;
- эквивалентная доза на хрусталик;
- эквивалентная доза на кожу.

Аппаратные средства дозиметрического контроля позволяют контролировать только поглощенную дозу радиационного воздействия на кожу космонавтов. На Международной космической станции (МКС) в качестве штатного средства индивидуального дозиметрического контроля используются дозиметры ИДЗ-МКС на основе термolumинесцентных стекол. Эти дозиметры космонавты должны носить постоянно во время полета, а обработка дозиметров проводится на Земле после окончания экспедиции. По результатам индивидуального дозиметрического контроля даже для участников одной экспедиции получены существенно различающиеся данные. В качестве примера рассмотрим некоторые результаты:

- экспедиция 1, 1-й космонавт –  $D = 44,0 \pm 2,0$ ; 2-й космонавт –  $D = 35,0 \pm 2,0$ ;
- экспедиция 2, 1-й космонавт –  $D = 31,0 \pm 1,2$ ; 2-й космонавт –  $D = 46,0 \pm 1,8$ ;
- экспедиция 3, 1-й космонавт –  $D = 24,6 \pm 1,8$ ; 2-й космонавт –  $D = 43,1 \pm 4,3$ ;
- экспедиция 4, 1-й космонавт –  $D = 36,0 \pm 2,0$ ; 2-й космонавт –  $D = 60,0 \pm 4,0$ ;
- экспедиция 5, 1-й космонавт –  $D = 57,0 \pm 3,0$ ; 2-й космонавт –  $D = 73,0 \pm 3,0$ ;
- экспедиция 6, 1-й космонавт –  $D = 53,0 \pm 3,0$ ; 2-й космонавт –  $D = 58,7 \pm 3,2$ .

Различающиеся данные дозиметрического контроля у космонавтов ставят вопрос о необходимости определения причин таких результатов.

Цель исследования – моделирование радиационных нагрузок на космонавтов на основе результатов измерений мощности поглощенной дозы в различных отсеках станции.

### Методика

В работе [2] представлены результаты измерений среднесуточной мощности поглощенной дозы в различных отсеках МКС в виде отношений локальной мощности поглощенной дозы к дозе на потолочной панели 327 рабочего отсека большого диаметра служебного модуля МКС. Эти данные получены с помощью датчиков дозиметра Пилле (разработка Венгерского института атомной энергии), основанных на термolumинесцентных стеклах. За прошедшее время они были дополнены измерениями в новых местах пребывания космонавтов. Пример рассмотрения некоторых из полученных результатов представлен в табл. 1.

На ночной сон космонавта в каюте отводится 8,5 ч (21.30–6.00 по Гринвичу). Иногда при проведении динамических операций (при прибытии или отстыковки транспортного пилотируемого корабля, грузового корабля, при проведении внекорабельной деятельности) начало и окончание пребывания космонавтов в каютах может сдвигаться по времени.



Транспортные пилотируемые корабли («Союз») стыкуются, как правило, к малым исследовательским модулям МИМ-1 и МИМ-2. После стыковки и встречи нового экипажа космонавты участвуют в разгрузке прибывшего корабля и заходят в соответствующие модули. Транспортные грузовые корабли («Прогресс») стыкуются, как правило, к стыковочному отсеку (модулю СО-1) либо к агрегатному отсеку служебного модуля. Для разгрузки этих кораблей космонавты заходят в модуль СО-1 или проходят через переходную камеру.

В работе [3] показано, что при большой продолжительности экспедиции можно не учитывать нахождение в определенном отсеке в строго фиксированное время, поскольку за период больше 4 мес происходит усреднение результатов расчетов с учетом установленного режима труда и отдыха (РТО) и без такого учета.

Для корректной оценки индивидуальной дозы радиационного воздействия необходимо знать, сколько времени космонавт проводит в том или ином отсеке станции. В справочнике пользователя [4] приводится типовой суточный режим быта экипажа российского сегмента МКС. Но в этом режиме приведена только последовательность выполнения космонавтом различных действий, но нет данных о том, где выполняются эти действия. Так, например, физические упражнения представлены 2 интервалами. Как правило, один интервал времени отводится на занятия на беговой дорожке, которая размещена в российском сегменте, а второй интервал времени отводится для занятий на силовом тренажере, который расположен в американском сегменте, либо на велоэргометре в российском сегменте МКС.

Рассмотрим вариант суточной циклограммы РТО космонавтов в следующем виде (табл. 2).

В данном случае предполагается использовать средние значения уровня радиационного воздействия (УРВ) по 3 малым модулям. Для экспедиции продолжительностью около 6 мес суммарное время нахождения в малых модулях составит порядка 3,5 сут. Европейский модуль «Коламбус» и японский модуль «Кибо» редко посещаются космонавтами, и без существенной потери точности их можно исключить из рассмотрения.

Определим индивидуальную дозу, полученную космонавтом, как произведение среднесуточной мощности поглощенной дозы на панели 327, умноженной на сумму произведений значений УРВ в каждом отсеке на долю времени нахождения космонавта в этом же отсеке. Необходимо заметить, что значения УРВ меняются со временем и в полученных результатах использованы значения, полученные для конкретных экспедиций. Если за время какой-либо экспедиции УРВ не определялся для конкретного места пребывания космонавта, то

использовалось значение, полученное за весь период наблюдений.

Для полного контроля поглощенных доз необходимо добавить значения доз, полученных при выполнении внекорабельной деятельности, а также дополнительную дозу от  $\gamma$ -источника мягкой посадки в кораблях типа «Союз». При этом необходимо также учитывать разные схемы стыковки транспортных кораблей с МКС (0,2–2,5 сут).

### *Результаты и обсуждение*

Итоговые результаты представлены в табл. 3.

Из анализа данных, представленных в табл. 3, следует, что предложенная методика в большинстве случаев оправдана. Наибольшее отклонение для 1-го космонавта 3-й экспедиции, по-видимому, связано с тем, что космонавт не носил с собой индивидуальный дозиметр, а положил его в более защищенное место.

Вариации РТО приводят к небольшим изменениям. Так, если ограничить пребывание в функциональном грузовом блоке (ФГБ) полчасом, а пребывание в малых модулях увеличить до 2 ч, то итоговые значения поглощенной дозы на кожу космонавтов увеличатся в среднем на 0,77 мГр.

Различия в дозах, полученных 1-м и 2-м космонавтами, в каждой экспедиции обусловлены в первую очередь различием УРВ в каютах. В зависимости от календарного времени УРВ в каюте правого борта менялся от 2,0 до 0,9, в каюте левого борта – от 1,8 до 0,8, в каюте американского сегмента – от 1,0 до 0,5. Большие значения среднесуточной мощности поглощенной дозы в каютах служебного модуля свидетельствуют о необходимости установки дополнительной защиты. Тем более что положительный опыт уже получен. За счет установки (с июля 2010 г. с перерывами по февраль 2016 г.) в каюте правого борта «шторки», заполненной средствами личной гигиены, удалось добиться снижения радиационного воздействия в среднем на ~30 % [3]. 15.09.2017 «шторка» восстановлена в каюте правого борта. К сожалению, как и в старом варианте, оболочка между поперечными стенками остается не полностью перекрытой.

Следующей причиной расхождений в результатах для одной и той же экспедиции могут быть индивидуальные особенности поведения космонавтов. Места нахождения космонавтов в МКС никем не фиксируются. Время отдыха космонавты часто проводят, наблюдая земную поверхность через иллюминаторы. В рабочем отсеке малого диаметра, где сосредоточены несколько иллюминаторов, защищенность станции со стороны пола небольшая, и за время пребывания около иллюминаторов космонавт получит дозу больше, чем, если он будет находиться у рабочего стола. Даже около боковой

Таблица 1

**Уровни радиационного воздействия (УРВ) на космонавтов в различных отсеках МКС в первой половине 2017 г.**

| №  | Место размещения датчика                         | УРВ         |
|----|--------------------------------------------------|-------------|
| 1  | Панель 327 на потолке в отсеке большого диаметра | 1,00 ± 0,00 |
| 2  | Рабочий стол                                     | 0,91 ± 0,05 |
| 3  | Каюта правого борта                              | 1,55 ± 0,25 |
| 4  | Каюта левого борта                               | 1,56 ± 0,09 |
| 5  | Рабочий отсек малого диаметра                    | 1,04 ± 0,02 |
| 6  | Ассенизационно-санитарное устройство             | 0,93 ± 0,01 |
| 7  | Функционально-грузовой блок                      | 1,04 ± 0,11 |
| 8  | Модуль СО-1                                      | 1,38 ± 0,18 |
| 9  | Модуль МИМ-1                                     | 1,44 ± 0,15 |
| 10 | Модуль МИМ-2                                     | 1,19 ± 0,02 |
| 11 | Переходная камера                                | 0,99 ± 0,14 |
| 12 | Силовой тренажер (американский сегмент)          | 0,82 ± 0,09 |
| 13 | Каюта в американском сегменте                    | 0,76 ± 0,07 |

Таблица 2

**Варианты РТО**

| № | Место пребывания космонавта     | ΔТ, ч | Доля  |
|---|---------------------------------|-------|-------|
| 1 | Каюта                           | 8,5   | 0,333 |
| 2 | Рабочий стол                    | 1,0   | 0,042 |
| 3 | Рабочий отсек большого диаметра | 5,5   | 0,208 |
| 4 | Рабочий отсек малого диаметра   | 5,0   | 0,208 |
| 5 | АСУ                             | 0,5   | 0,021 |
| 6 | Силовой тренажер                | 1,0   | 0,083 |
| 7 | ФГБ                             | 2,0   | 0,083 |
| 8 | Малые модули                    | 0,5   | 0,021 |

Таблица 3

**Значения индивидуальных доз (в мГр) космонавтов, полученные по представленной методике**

| Экспедиция | Космонавт | Измерения  | Оценка | δ%    |
|------------|-----------|------------|--------|-------|
| 1          | 1         | 44,0 ± 2,0 | 36,03  | -18,1 |
|            | 2         | 35,0 ± 2,0 | 40,82  | 16,6  |
| 2          | 1         | 31,0 ± 1,2 | 35,44  | 14,3  |
|            | 2         | 46,0 ± 1,8 | 41,72  | -9,3  |
| 3          | 1         | 24,6 ± 1,8 | 46,96  | 90,9  |
|            | 2         | 43,1 ± 4,3 | 41,59  | -3,5  |
| 4          | 1         | 36,0 ± 2,0 | 36,83  | 2,3   |
|            | 2         | 60,0 ± 4,0 | 44,01  | -26,6 |
| 5          | 1         | 57,0 ± 3,0 | 46,71  | -18,1 |
|            | 2         | 73,0 ± 3,0 | 57,85  | -20,8 |
| 6          | 1         | 53,0 ± 3,0 | 50,72  | -4,3  |
|            | 2         | 58,7 ± 3,2 | 61,61  | 5,0   |

стенки отсека малого диаметра УРВ в отдельные периоды достигал значения 1,3. Некоторые космонавты использовали в качестве места подготовки к внекорабельной деятельности малые модули, где УРВ достигал значения в 2,3 (в МИМ-2).

Все названные причины могут приводить к увеличению значений поглощенной дозы. При этом можно отметить, что ни в одном случае существующие нормативы радиационной безопасности не были превышены.

Измеренная или оцененная величина поглощенной дозы на кожу космонавта не является полной. Ни индивидуальный дозиметр ИДЗ-МКС, ни датчики Пилле не регистрируют дозу нейтронов. Согласно экспериментальным исследованиям [5, 6], дополнительный вклад в эквивалентную дозу от нейтронов составляет ~25–30 % в больших модулях, а в каютах и в малых модулях ~10–15 %. Переход от поглощенной дозы к эквивалентной дозе возможен только расчетным путем [7], так же как оценка эффективной дозы [8]. При этом необходимо заметить, что в расчетах вторичные нейтроны учитываются.

Если расчетным путем получить значение эффективной дозы, взять отношение ее к дозе на кожу и полученное значение умножить на экспериментально измеренную дозу на кожу космонавта, то с учетом вклада нейтронов можно оценить экспериментальное значение эффективной дозы.

### Выводы

1. Необходимо совершенствование существующей практики радиационного контроля. Определение средней поглощенной дозы, действующей на экипаж МКС, должно быть дополнено контролем пребывания космонавтов в различных отсеках МКС.

2. Каюты служебного модуля МКС нуждаются в дополнительной противорадиационной защите.

*Работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН по теме № 65.2 и при финансовой поддержке РКК «Энергия» по договору № 16-03-930 от 27.12.2016.*

### Список литературы

1. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2004). Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2004. М., 2004.

Limiting the irradiation of astronauts in near-earth space missions (LEANESM-2004). Methodical instruction MI 2.6.1.44-03-2004, Moscow, 2004.

2. Бондаренко В.А., Митрикас В.Г., Цетлин В.В. Пространственное распределение локальных поглощенных доз в российском сегменте Международной космической станции // *Авиакосм. и экол. мед.* 2011. Т. 45. № 4. С. 22–27.

Bondarenko V.A., Mitrikas V.G., Tsetlin V.V. Spatial distribution of local absorbed doses inside the Russian segment of the International space station // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2011. V. 45. № 4. P. 22–27.

3. Карташов Д.А., Толочек Р.В., Шуршаков В.А., Ярманова Е.Н. Расчет радиационных нагрузок в отсеке космической станции при использовании дополнительной защиты // Там же. 2013. Т. 47. № 6. С. 61–66.

Kartashov D.A., Tolochev R.V., Shurshakov V.A., Yarmanova E.N. Calculation of radiation loads in a space station compartment with a secondary shielding // *Ibid*. 2013. V. 47. № 6. P. 61–66.

4. [https://www.energia.ru/ru/iss/researches/iss\\_rs\\_guide.pdf](https://www.energia.ru/ru/iss/researches/iss_rs_guide.pdf). Российский сегмент МКС. Справочник пользователя. Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева. 2016.

[https://www.energia.ru/ru/iss/researches/iss\\_rs\\_guide.pdf](https://www.energia.ru/ru/iss/researches/iss_rs_guide.pdf). Russian segment of the ISS. Users' reference book. S.P. Korolev «Energia» rocket and space corporation. 2016.

5. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Результаты измерения дозы и энергетического спектра нейтронов внутри российского сегмента Международной космической станции в эксперименте «Матрешка-Р» с использованием пузырьковых детекторов в период экспедиций МКС 24–34 // *Авиакосм. и экол. мед.* 2014. Т. 48. № 2. С. 52–56.

Khulapko S.V., Liagushin V.I., Arkhangelskiy V.V. et al. Results of measuring neutrons doses and energy spectra inside Russian segment of the International space station in experiment «Matreshka-R» using bubble detectors during the ISS 24–34 missions // *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina*. 2014. V. 48. № 2. P. 52–56.

6. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Сравнение эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронов внутри шарового тканезквивалентного фантома на борту российского сегмента Международной космической станции // Там же. 2016. Т. 50. № 2. С. 47–52.

Khulapko S.V., Liagushin V.I., Arkhangelskiy V.V. et al. Comparison of dose equivalents from charged particles and neutrons inside the spherical tissue-equivalent phantom on the Russian segment of the International space station // *Ibid*. 2016. V. 50. № 2. P. 47–52.

7. Митрикас В.Г. Оценка эффективных доз ионизирующей радиации у экипажей Международной космической станции методом расчетного моделирования // Там же. 2015. Т. 49. № 1. С. 5–11.

Mitrikas V.G. Estimation of ionizing radiation effective doses in the international space station crews by the method of calculation modeling // *Ibid*. 2015. V. 49. № 1. P. 5–11.

8. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Утв. Гл. санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко 7.07.2009.

Radiation safety standards (RSS-99/2009). Approved by the Chief sanitary doctor of RF G.G. Onishchenko 07.07.2009.

Поступила 27.09.2017

## **CALCULATION OF PERSONAL DOSES TO COSMONAUTS BY READINGS OF THE BOARD DOSIMETERS**

**Mitrikas V.G., Khorosheva E.G.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).  
2018. V. 52. № 2. P. 29–33

*Radiation monitoring of cosmonauts demands estimation of personal absorbed doses received in spacecraft*

*compartments varying in their shielding properties. The paper describes how to calculate the dose from readings of the Pille dosimeters. A relatively simple technique discloses whether or not a cosmonaut carried the personal dosimeter permanently. Results of these dose calculations provide another evidence for additional radiation shielding of crew quarters in the ISS Service module.*

Key words: space ionizing radiation, effective dose, quality factor.



УДК 004.896:681.3.06; 519.8; 614.8

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РОБОТОВ-СПАСАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗВИТИИ МЕДИЦИНСКИХ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ ВО ВРЕМЯ ВНЕКОРАБЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Поляков А.В.<sup>1</sup>, Алтунин А.А.<sup>2</sup>, Крючков Б.И.<sup>2</sup>, Мотиенко А.И.<sup>3</sup>, Ронжин А.Л.<sup>3</sup>, Усов В.М.<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина, Звездный городок, Московская область

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

E-mail: apolyakov@imbp.ru

*В настоящее время для освоения Луны в ходе пилотируемых миссий рассматривается применение робототехнических систем (РТС). Поскольку в ходе внекорабельной деятельности (ВКД) на поверхности Луны может возникнуть ухудшение самочувствия и работоспособности космонавта, актуальны вопросы определения состава РТС и их функционала для экстренной эвакуации утратившего работоспособность космонавта с поверхности Луны в шлюзовой отсек лунного аппарата.*

*В работе обобщены сведения, необходимые для уточнения медико-технических требований к аварийно-спасательным роботам (АСР) и к роботизированным системам, расширяющие возможности оперативного принятия решений о тяжести последствий нештатных ситуаций при ВКД, исходя из анализа прототипов АСР, которые применяются в наземных условиях при чрезвычайных ситуациях для эвакуации пострадавших.*

**Ключевые слова:** внекорабельная деятельность, поверхность Луны, нештатные ситуации, потеря работоспособности космонавта, эвакуация в лунный аппарат, аварийно-спасательные роботы.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 34–41.

**DOI:** 10.21687/0233-528X-2018-52-2-34-41

Космическая медицина неоднократно сталкивалась с технологическими вызовами, когда особую остроту приобретала проблема сохранения жизни и здоровья космонавта-испытателя сложных космических комплексов. Во многих случаях новые задачи удавалось решить, опираясь на практический опыт авиационной медицины для построения систем жизнеобеспечения, спасения и защиты организма человека в экстремальной среде. Космическая медицина обладает достаточным арсеналом средств, чтобы свести к минимуму риски снижения работоспособности космонавта в орбитальных полетах, обеспечить своевременную эвакуацию космонавтов после приземления и быстрое восстановление функциональных резервов в послеполетный

период. Однако новый этап развития космических проектов, включающих освоение Луны, требует рассмотрения проблемы, каким образом осуществлять медицинское обеспечение экипажей в медицинских нештатных ситуациях (НШС), которые характеризуются снижением работоспособности человека и нарушениями функций жизненно важных систем организма. В частности, при существенном снижении поддержки с Земли, при автономной работе экипажа на поверхности Луны, применяемый комплекс медико-технических средств должен гарантировать спасение членов экипажа при отказах системы жизнеобеспечения космического скафандра (СЖ КС) в ходе внекорабельной деятельности (ВКД). В первую очередь необходимо решить вопрос, каким образом и с применением каких медико-технических средств можно выполнить срочные эвакуационные мероприятия по перемещению космонавта в КС с лунной поверхности в шлюзовой отсек лунного аппарата. Без выполнения этой первой фазы работ говорить об эффективности дальнейших мероприятий по оказанию медицинской помощи космонавту не приходится. Очевидно также, что оперативный контроль сохранности витальных функций может помочь принятию решений о создании адекватных условий для выживания в лунном модуле в случае возникновения НШС при освоении Луны.

*Существующие проекты применения роботов-помощников во внешней среде на базе автономных мобильных роботов*

В планируемых проектах освоения Луны предусматривается применение различных робототехнических систем (РТС). В аспектах прогнозируемых условий деятельности космонавтов на поверхности Луны целесообразно в первую очередь рассмотреть вопрос об использовании автономного мобильного робота (АМР), который может выступать в роли робота-помощника и способен к выполнению различных работ в автономном режиме

навигации, распознаванию движущихся и стационарных объектов, сбору и передаче телеметрических данных и других функций, повышающих его адаптивные возможности к условиям внешней среды.

В число потенциально полезных функций робота-помощника может входить перенос грузов и инструментов, помощь космонавту в решении задач позиционирования и навигации, поддержка в построении коммуникаций между участниками ВКД с применением ряда современных информационных технологий [1, 2]. В этом отношении АМР может рассматриваться как прототип в объеме базовых требований к функционалу АСР.

При неблагоприятном стечении обстоятельств, когда малочисленный экипаж при имеющихся резервах времени не может обеспечить собственными силами срочную безопасную эвакуацию космонавта с ухудшением самочувствия и работоспособности, необходим поиск новых «ассистивных» средств экстренного реагирования, и АМР могут служить в качестве исходных прототипов АСР для применения на лунной поверхности. Однако требуется дополнительный анализ и уточнение вопросов, какие медико-технические требования должны выдвигаться к АСР и какие инструментальные средства могут применять члены экипажа для проведения эвакуации и шлюзования космонавта с нарушениями самочувствия и работоспособности с учетом высокой автономности работы экипажа в лунных экспедициях. Для этого необходимо уточнить условия, влияющие на сохранение работоспособности космонавта при ВКД на лунной поверхности.

*Условия на лунной поверхности, определяющие требования к организации работ по спасению и эвакуации космонавтов*

Показательный пример новых потенциальных областей внедрения космических РТС – ВКД на поверхности Луны, выполняемая космонавтом, одетым в КС. Здесь и далее обсуждается вариант работы малочисленного экипажа лунных экспедиций, которому требуется поддержка со стороны роботов-помощников. При выходе группы космонавтов на поверхность Луны предусматривается, что один из членов экипажа может удаленно управлять роботом-помощником из лунного модуля для экстренного вмешательства в случае возникновения НшС. В этой роли указанный член экипажа выполняет функции руководителя и диспетчера ВКД.

Структура и состав основных факторов и условий на поверхности Луны, которые необходимо принимать во внимание при проектировании спасательных и эвакуационных работ с применением АСР, представлены в работах [3–7].

Перечислим некоторые из прогнозируемых условий и особенностей.

В силу влияния лунной гравитации ( $g = 1,623 \text{ м/с}^2$ ) при выполнении ВКД на лунной поверхности изменится по отношению к деятельности космонавта на борту МКС не только биомеханика перемещений, но и локомоторная активность человека в целом. При этом действие гравитации будет усугубляться влиянием работы в КС, в частности, влияние лунной гравитации проявляется в кратном увеличении времени выполнения операций по соединению всех исследованных типов разъемов и типов крепежа, аналогично тому, как это показано в работе [3].

Существует еще целый ряд факторов и условий, которые требуют пристального внимания при учете их влияния на деятельность лунных экипажей [5, 7]. К ним относятся: сложный рельеф местности, в том числе наличие кратеров с крутыми склонами (до  $40^\circ$ ), а также вертикальных и горизонтальных тоннелей вулканического происхождения; радиация; метеориты; лунная пыль и др. Эти же условия будут затруднять перемещение АСР на лунной поверхности.

Также имеются данные о негативном влиянии на качество деятельности космонавтов такого фактора, как освещенность, что приводит к существенному росту трудозатрат, числа ошибочных действий по контролю работы систем скафандра, считыванию показаний приборов, своевременному обнаружению значимых сигналов о НшС. Поскольку из-за отсутствия атмосферы на Луне не происходит рассеяние света, при переходе от освещенных зон к затененным возникает резкая контрастность, что создает опасности для космонавта, как при перемещениях, так и при ведении ориентировки на местности.

Ограниченность движений рук в КС и зоны обзора из шлема вносят дополнительные трудности. Современный КС спроектирован таким образом, что космонавт хорошо видит рабочую зону в пределах досягаемости объектов с помощью рук, а обзор наблюдаемого через остекление шлема пространства позволяет вести пространственную ориентировку на поверхности МКС. Следовательно, есть основания говорить о том, что ограничения подвижности и обзора в КС могут стать более серьезным помеховым фактором для ВКД на лунной поверхности, особенно в плане ведения пространственной ориентировки и навигации [1].

Рассмотрим далее, при каких НшС экипажу будет необходима поддержка с использованием АСР. При определении проектируемого функционала АСР для работ на лунной поверхности следует принимать во внимание отказы СЖ КС, разгерметизацию КС, резкое ухудшение самочувствия и/или потери космонавтом работоспособности под воздействием комплекса факторов экстремальной среды. Во всех перечисленных НшС требуется экстренное

Таблица 1

**Затраты времени на выполнение отдельных операций в полунатурном эксперименте на тренажере «Выход-2» (цит. по работе [8])**

| № п/п                     | Название операции                                                                                                                                                                        | Длительность выполнения операции (ч:мин:с) |            |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------|
|                           |                                                                                                                                                                                          | Оператор 1                                 | Оператор 2 |
| 1                         | Наддув скафандра, переход на автономное питание, открытие выходного люка                                                                                                                 | 0:03:03                                    | 0:02:10    |
| 2                         | Перемещение с мягким фалом к площадке, подъем по ступеням на площадку, спуск с площадки. Перемещение к лестнице, фиксация мягкого фала к лестнице                                        | 0:06:02                                    | 0:05:16    |
| 3                         | Перемещение к контейнеру (подъем на площадку, спуск по ступеням, перемещение за контейнером). Перемещение с контейнером на площадку, спуск с площадки, размещение контейнера на площадке | 0:01:23                                    | 0:01:54    |
| 4                         | Открытие контейнера, извлечение антенны, и разъемов. Перемещение с антенной к трапу, подъем по трапу, фиксация антенны на поручне. Спуск по трапу                                        | 0:05:21                                    | 0:02:26    |
| 5                         | Подстыковка электроразъемов, укладка их в фиксаторы                                                                                                                                      | 0:01:12                                    | 0:01:17    |
| 6                         | Перемещение и закрытие выходного люка                                                                                                                                                    | 0:00:18                                    | 0:03:04    |
| 7                         | Технологические операции (вход в скафандр, подгонка скафандра и обезвешивание, выход из скафандра и др.).                                                                                | 0:20:30                                    | 0:22:04    |
| Суммарные затраты времени |                                                                                                                                                                                          | 0:37:49                                    | 0:38:11    |

реагирование для спасения этого космонавта из «команды выхода», его эвакуации, перемещения с поверхности в лунный модуль и шлюзования.

Если ориентироваться на технические характеристики современных КС, то для спасения и выполнения указанных операций будет предусмотрен определенный запас времени (до получаса) с достаточным резервом газовой смеси для дыхания. Однако это не снимает остроту проблемы, особенно в аспектах возможного нарушения герметичности КС, ухудшения работоспособности даже при незначительной величине утечки газа и потери сознания по ряду других известных из космической физиологии причин.

Приведенные данные служат весомым аргументом для рассмотрения вопросов информационной поддержки космонавта-диспетчера для принятия решений по срокам проведения эвакуационных работ и шлюзования на основе текущего контроля состояния космонавта, параметров функционирования СЖ КС, резерве газовой смеси для дыхания с учетом навигационной обстановки.

*Прогнозируемые временные затраты на выполнение типовых операций ВКД с учетом условий на лунной поверхности*

До настоящего времени натурные исследования по изучению психофизиологических возможностей космонавтов по выполнению операторских задач после высадки экипажа на Луну и при работе на лунной поверхности, а также для установления нормативов выполнения типовых операций ВКД в полном объеме не проводились. Тем большую

ценность представляют отдельные экспериментальные исследования на полунатурных моделях [8], направленные на изучение возможности передвижения и выполнения космонавтами типовых операций ВКД непосредственно после выполнения длительных космических полетов. В частности, в работе [8] оценивалось время, затрачиваемое на типовые операции, включая шлюзование, перемещение по ровной и неровной поверхности, перенос груза, извлечение инструмента из контейнера, операции с инструментом, подъем по трапу и спуск с него, фиксация с помощью лееров и карабинов и др., 2 космонавтами экипажа МКС-33/34 в период послеполетных мероприятий на 4-й день после приземления. Исследование проводилось при работе в КС типа «Орлан», ориентированном в вертикальном положении в системе весовой разгрузки (обезвешивания) на тренажере «Выход-2» [9].

Полученные эмпирические данные представляют несомненный интерес в том отношении, что они могут служить ориентиром для оценки затрачиваемого времени на выполнение требуемых действий в ходе шлюзования в штатных скафандрах типа «Орлан» при лимите времени, сопоставимом с резервом времени на возвращение в безопасный герметически замкнутый объект (космический аппарат) с учетом аварийного запаса дыхательной смеси КС.

По результатам экспериментальных исследований, представленных в работе [8], сделаны выводы о принципиальной возможности выполнения космонавтами отдельных операций по управлению системами КС и другим оборудованием в процессе шлюзования и ВКД (табл. 1).

Остроту и актуальность проблемы изучения психофизиологических возможностей космонавта при работе в КС на Луне, учитывая сложный состав выполняемых операций при экстренной эвакуации и шлюзовании космонавта, одетого в КС, также подчеркивают результаты проведения космического эксперимента «Полевой тест» [10], где показано, что после длительного полета выявляются ограничения двигательной активности космонавтов непосредственно после приземления спускаемого аппарата.

*Опыт подготовки космонавтов к проведению спасательных работ в ходе ВКД с эвакуацией космонавта, одетого в КС*

При разработке новых предложений к вариантам реализации ВКД на лунной поверхности необходимо учитывать многолетний опыт подготовки космонавтов к работе в КС, выживанию в разных климатогеографических зонах, выполнению неотложных медицинских мероприятий на борту космического аппарата и, наконец, опыт самой ВКД на орбитальных станциях. Очевидно, что такого рода подготовка будет проводиться и применительно к ВКД на лунной поверхности, хотя в этом случае ВКД будет осложняться еще и тем обстоятельством, что работоспособный космонавт должен будет рационально взаимодействовать с АСР и с космонавтом-диспетчером, который будет выполнять функции, аналогичные тем, которые возлагаются на специалистов ЦУП при полетах на МКС.

Практика подготовки космонавтов к выполнению ВКД свидетельствует, что для слаженной работы экипажа и строгого выполнения требований безопасности работ требуется формирование у космонавтов устойчивых навыков выполнения спасательных работ, организации транспортировки человека в скафандре и психологическая готовность к проведению экстренной эвакуации.

Подготовка по данному направлению, проводимая в гидролаборатории и на специализированном тренажере «Выход-2», нацелена на формирование навыков по безопасной транспортировке пострадавшего человека, находящегося вне станции, в шлюзовой отсек российского сегмента МКС с постоянным контролем за рабочими параметрами КС [3].

Наземные АСР, рассматриваемые как прототипы применительно к ВКД на лунной поверхности

В технологически развитых странах мира существует ряд научно-технических проектов по созданию роботизированных систем в различных областях медицины. Однако далеко не все направления современных технологий получили должную оценку на предмет их перспективности для практического внедрения в условиях экстремальной среды, а многие роботизированные системы были разработаны исключительно для клинического стационара и адаптировать их для

полевых условий не представляется возможным. Из этого следует необходимость разработки новых подходов к организации и техническому обеспечению работ как по спасению и эвакуации пострадавших людей, так и для защиты лиц опасных профессий в той экстремальной среде, в которой они повседневно выполняют свои функции. В частности, новые проекты пилотируемых полетов и освоения Луны будут сопровождаться такими условиями, в которых затруднена оперативная поддержка космонавтов с Земли, но при этом даже при малочисленности экипажа можно выполнять многие сложные операции с взаимной поддержкой и страховкой при использовании АСР, если они отвечают эксплуатационным требованиям и имеют необходимый функционал.

Сегодня проблеме спасения людей с использованием средств робототехники посвящено большое число публикаций. В работе [11] систематизированы данные о зарубежных и отечественных разработках спасательных роботов в зонах ЧС, исходя из состава контингента, для которого необходимо изыскивать дополнительные ресурсы для проведения эвакуационных мероприятий.

В свете таких предпосылок анализируются правила и способы спасения и транспортировки пострадавших с помощью различных типов роботов-спасателей.

По результатам изучения ряда источников представляется необходимым отбирать потенциально пригодные решения для адаптации существующих наземных РТС к условиям освоения человеком Луны по ряду отличительных признаков, предусмотрев возможности:

- обеспечения устойчивости к опрокидыванию при переноске грузов, сопоставимых по массе с массой робота, за счет правильного соотношения массогабаритных характеристик и грузоподъемности;
- передвижения по пересеченной местности и различным по плотности почвам, выполнения маневров для преодоления естественных и искусственных препятствий;
- захвата и удержания предметов различной формы, жесткости. Способ захвата тела человека и погрузки на платформу робота или перенос «на руках» антропоморфного робота;
- выполнения позиционирования и навигации в условиях освоения Луны, использования электронных карт и дистанционно задаваемых команд на виды маневров от человека-оператора;
- выполнения трекинга подвижных объектов, определения расстояний, распознавания ориентиров и характерных объектов с помощью компьютерного зрения робота;
- организации человеко-машинного взаимодействия, применения многомодальных интерфейсов для дистанционного управления роботом,



Таблица 2

**Сравнительный анализ тактико-технических характеристик некоторых образцов АСР, рассматриваемых как прототипы для ВКД на Луне**

| Требования                                                                             | Аварийно-спасательные роботы |                 |                |                  |                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|------------------|----------------------|
|                                                                                        | BEAR                         | CHIMP           | DRC-HUBO       | Atlas            | FEDOR                |
| Массогабаритные характеристики                                                         | 1,8 м<br>227 кг              | 1,5 м<br>181 кг | 1,8 м<br>80 кг | 1,88 м<br>156 кг | 1,84 м<br>106–160 кг |
| Грузоподъемность (кг)                                                                  | 270                          | 140             | 30             | 4,5              | 10                   |
| Автономная работа при разовой подзарядке (мин)                                         | 30–60                        | 90              | 130            | 60               | 30–60                |
| Удаленное взаимодействие с ЧО                                                          | +                            | +               | +              | +                | +                    |
| Возможности поддержки принятия решений ЧО                                              | +                            | +               | +              | +                | +                    |
| Возможность мониторинга состояния пострадавшего (при наличии соответствующих датчиков) | +                            | +               | +              | +                | +                    |
| Копирующий режим выполнения манипуляций                                                | -                            | -               | +              | -                | +                    |

возможности бесконтактных видов управления с применением технологий виртуальной реальности, возможности построения расширенной и улучшенной визуальной обратной связи;

– выполнения тонких манипуляций в копирующем режиме и режима следования за человеком при перемещении друг за другом «в паре».

На сегодня в той или иной степени эти признаки представлены в ряде образцов, которые прошли испытания, в том числе в натурных условиях, хотя специалисты по-прежнему не вполне удовлетворены существующим уровнем разработок в отношении простоты эксплуатации, стоимости изделий, энерговооруженности и защищенности от экстремальных факторов среды. Анализ многочисленных источников показывает, что базовые подходы и решения в области наземного применения АСР в натурных условиях по ряду причин неоднородны. Во многом эти решения диктуются условиями применения: характером рельефа, составом почвы, возможностями использования различных средств позиционирования и навигации, связи, протяженностью маршрутов между этапами эвакуации и др.

Если обратиться к выбору конструкции и функциональности робота, перспективного для применения на поверхности Луны, то по результатам проведенного в работе [11] анализа, а также с учетом электронных публикаций новостных интернет-каналов, обращают на себя внимание несколько удачных и апробированных на практике конструкций, которые представлены в табл. 2.

Ранее указывалось на некоторые отличительные особенности современных АМР, которые позволяют на их основе сформулировать базовые требования к функционалу АСР как мобильному беспилотному аппарату с набором адаптивных свойств, необходимых для ведения ориентировки и навигации в малоизученной среде. Но при этом функционал АСР должен быть существенно расширен из-за особенностей транспортировки именно тела пострадавшего человека, одетого в специальное защитное

снаряжение. В частности, в требованиях к АСР в отношении его мобильности и устойчивости, помимо уменьшенной гравитации на поверхности Луны, необходимо учитывать трудности передвижения по поверхности из-за характера лунной почвы.

На основе табл. 2 можно представить на обсуждение состав тех медико-технических требований, из которых вытекает возможная тактика проведения эвакуационных работ.

Обращает на себя внимание тот факт, что при сопоставимых значениях массогабаритных параметров представленные в табл. 2 образцы АСР существенно отличаются по грузоподъемности, а следовательно, далеко не все способы перемещения пострадавшего могут быть с их помощью реализованы (имея в виду варианты переноса «на руках», помещения в транспортируемый внешний модуль, размещение внутри АСР и др.). Представляется, что наилучшие решения в отношении грузоподъемности для ВКД на лунной поверхности лежат в диапазоне величин, превышающих массу человека в КС.

При задании допустимого времени автономной работы (при разовой подзарядке) надо брать за основу резервное время, связанное с запасами дыхательной смеси в КС, но, как минимум удваивая его с учетом длины маршрута, скорости передвижения АСР и времени на шлюзование в лунный модуль человека, одетого в КС. Показанные в табл. 2 лучшие образцы дают возможность рассчитать допустимое удаление от лунного модуля, которое позволяет обеспечить эвакуацию в приемлемые сроки, что должно найти отражение в системе информационного обеспечения хода спасательных работ.

Несколько позиций табл. 2 отражают требования к характеру человеко-машинного взаимодействия. Можно предположить, что при прочих равных условиях возможность интерактивного взаимодействия человека-оператора (ЧО) с АСР в удаленном режиме существенно повышает шансы безопасного выполнения эвакуационных работ.



Необходимо отметить, что поддержание оперативного режима коммуникации всех участников ВКД, включая космонавта-диспетчера, приобретает особую важность в случае НшС, не предусмотренных заранее и требующих оперативного согласования плана работ для их купирования.

Особо следует выделить проблемы включения в состав АСР или придание им в качестве сменного оборудования инструментальных систем медицинского назначения, позволяющих дистанционно оценить характер и тяжесть поражения. Проблемы спасения человека в условиях чрезвычайной ситуации и на поле боя стимулировали интерес к применению АСР и в дополнение к ним – специализированных роботизированных транспортных платформ (с системой жизнеобеспечения и транспортировки пораженного). Такие платформы оснащаются набором медицинского оборудования для поддержания жизненно важных функций на этапах медицинской эвакуации, а также в их состав могут быть введены дистанционно управляемые манипуляторы, позволяющие в интерактивном режиме проводить экспресс-обследование пострадавшего для своевременной оценки характера и тяжести поражения и принимать решение об объеме неотложной медицинской помощи.

Кроме того, особенности человеческого фактора в НшС требуют обратить особое внимание на уровень подготовки ЧО, проводящего мероприятия по спасению и эвакуации.

Важным элементом транспортировки является выбор оптимальной позы пораженных. В работе [12] систематизированы данные о модели определения позы пораженного при транспортировке с учетом его травм и состояния. Транспортировка должна осуществляться бережно, чтобы не усиливать тяжесть поражения и болевой синдром, так как усиление боли не только ухудшает общее состояние пораженного, но и может стать причиной развития посттравматического шока. К разрабатываемым образцам робота-санитара предъявляются разнообразные требования по безопасности операций поиска, спасения и эвакуации, позволяющие учитывать особенности, связанные с транспортировкой в полевых условиях, что приводит к разным конструктивным решениям и разному функционалу. В этом отношении заслуживает упоминания робот-санитар BEAR (Battlefield Extraction-Assist Robot), который по своим характеристикам в целом отвечает потребностям применения робота-спасателя при ВКД на лунной поверхности [13, 14].

Возможно, полезным дополнением к этому роботу мог бы стать «змеевидный» (гиперизбыточный) робот-диагностический манипулятор [15], который исследователи из американского Университета Карнеги – Меллон разработали для помощи медицинскому персоналу в ходе визуального

дистанционного обследования пораженного непосредственно на поле боя.

К описанному выше роботу-санитару BEAR близок по конструкции и назначению Mini Robocue – робот, разработанный фирмой Kikuchi Manufacturing в Японии [16], который может рассматриваться как прототип для разработки робота для эвакуации человека в скафандре на лунной поверхности, так как в некоторых ситуациях ВКД необходимо дублировать работу СЖ КС. Необходимо особо отметить, что этот робот-спасатель может быть оснащен дополнительными манипуляторами для работы с большим количеством различных предметов.

Кроме двух вышеприведенных вариантов мобильных роботов на гусеничном ходу обращает на себя внимание большой интерес к созданию антропоморфных моделей, что видно из зарубежных образцов CHIMP, HUBO, Atlas и SAR-491 (и его модификация FEDOR) и др. от отечественных разработчиков [17–21].

### Выводы

1. Внекорабельная деятельность (ВКД или в англ. аббревиатуре EVA) является неотъемлемой составной частью работы экипажа при освоении космоса, и ее качество во многом определяет успех любой пилотируемой программы. В перспективе многие элементы ВКД могут безопасно и эффективно выполняться с использованием роботов-помощников, но особо важные операции, в том числе и такие, как спасение космонавта, проведение эвакуации и шлюзования в лунный аппарат и др., требуют участия хорошо подготовленных членов экипажа.

2. Эффективность и успех будущих миссий зависят, в числе прочего, от медико-технического обеспечения ВКД и с приоритетом достижения компромисса между выполнением поставленных задач и минимизацией рисков для здоровья и безопасности членов экипажа.

3. Поскольку при выполнении работ в экстремальной среде возникают НшС, опасные для жизни человека, не теряет своей актуальности робототехническое обеспечение операции по транспортировке космонавта в скафандре и его перемещения с лунной поверхности к шлюзовому отсеку лунного модуля. В то же время можно определенно говорить о недостаточной изученности этого вопроса в экспериментальном плане, что заставляет обращаться к аналогам и прототипам при выборе средств спасения и эвакуации, опираясь на опыт применения АСР в наземных условиях.

4. Существуют вполне успешные разработки спасательных роботов для чрезвычайных ситуаций на Земле, которые можно рассматривать как прототипы для разработки робота-спасателя для

применения на поверхности Луны, но одновременно надо принимать во внимание существующие отличия земных условий и условий на поверхности Луны.

5. Среди множества современных робототехнических средств особое место занимают мобильные роботы. Широкий спектр функциональных возможностей и постоянная готовность к применению делают их привлекательными для служб экстренного реагирования. Как показывает анализ публикаций последних лет, производителями мобильных роботов достигнуты значительные успехи в решении проблем повышения проходимости роботов по пересеченной местности и их адаптации к экстремальным условиям, хотя узким местом остается энергетическое обеспечение длительного функционирования. Достаточно успешно решаются задачи поиска рационального маршрута движения и навигации АМР при различном составе исходных данных и средств измерения и связи. Построение человеко-машинного взаимодействия при необходимости контроля функционирования АМР в сложно-структурированной внешней среде по-прежнему встречает определенные трудности.

6. При выборе путей создания и применения АСР для эвакуации космонавта при НшС в ходе ВКД на лунной поверхности необходимо конкретизировать состав тех рисков и угроз, которые непосредственно вытекают из характера решаемых задач, характеристик средств защиты организма и средств обеспечения жизнедеятельности, располагаемых средств спасения, резерва времени на проведение эвакуационных мероприятий.

В данной статье представлены основные возможности построения взаимодействия людей и роботов в составе команды, которые могут улучшить проведение мероприятий по организации спасения и эвакуации в ходе ВКД на лунной поверхности космонавта с перемещением его в лунный модуль.

*Работа выполнена в рамках базовой темы РАН № 65.1 и госбюджетной темы 0073-2018-0003 (№ госрегистрации АААА-А16-116030250074-1).*

#### Список литературы

1. Ворона А.А., Сыркин Л.Д., Крючков Б.И., Усов В.М. Визуальное представление космонавту перемещений группы автономных мобильных роботов на поверхности Луны для предотвращения их коллизий // Пилотируемые полеты в космос. 2016. № 3 (20). С. 41–57.

Vorona A.A., Syrkin L.D., Kryuchkov B.I., Usov V.M. Visual displaying a group of autonomous mobile robots moving on the Moon's surface in order that a cosmonaut could prevent their collisions // Pilotiruemye polety v kosmos. 2016. V. 3 (20). P. 41–57.

2. Крючков Б.И., Михайлюк М.В., Усов В.М. Технологии моделирования для эргономического

проектирования системы «космонавт – манипуляционный робот – рабочая среда» // Матер. конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС-2014). СПб., 2014. С. 367–377.

Kryuchkov B.I., Mikhaylyuk M.V., Usov V.M. Simulation technologies for the ergonomic design of the «astronaut – manipulative robot – work environment» system // Materialy konferentsii «Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh» (UMAS-2014). St.-Petersburg, 2014. P. 367–377.

3. Долгов П.П., Алтунин А.А., Верба Д.И. и др. Внекорабельная деятельность космонавтов: подготовка экипажей, опыт выполнения на РС МКС, роль и место в перспективных проектах // Научно-практическая конференция с международным участием «Космонавтика XXI века» (International conference «Cosmonautics in XXI century») (29–30 ноября 2016 г., г. Королёв).

Dolgov P.P., Altunin A.A., Verba D.I. et al. Extravehicular activities of cosmonauts: training of crews, experience in RS the ISS, role and place in future projects // Nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Kosmonavtika XXI veka» (International conference «Cosmonautics in XXI century»). (Nov. 29–30, 2016, Korolev).

4. Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И. и др. Особенности деятельности космонавтов при выполнении лунных экспедиций // Тезисы Междунар. конф. «Пилотируемое освоение космоса». (24–26 мая, 2016, г. Королёв). М., 2016. Electronic edition / 1 CD ROM. International Academy of Astronautics. ISBN 978-906519-38-2. Sec.3-B. Crew Training. С. 152.

Kryuchkov B.I., Usov V.M., Yaropolov V.I. et al. Characteristics of the activities of astronauts in the performance of lunar expeditions // Proc. of IAA conference «Human Space Exploration» (May 24–26, 2016, Korolev): Abstract book. Moscow, 2016. Electronic edition / 1 CD ROM. International Academy of Astronautics. ISBN 978-906519-38-2. Sec.3-B. Crew Training. P. 152.

5. Крючков Б.И., Усов В.М., Ярополов В.И. и др. Об особенностях профессиональной деятельности космонавтов при осуществлении лунных миссий // Пилотируемые полеты в космос. 2016. № 2 (19). С. 35–57.

Kryuchkov B.I., Usov V.M., Yaropolov V.I. et al. On the features of professional activity of cosmonauts when implementing lunar missions // Pilotiruemye polety v kosmos. 2016. V. 2 (19). P. 35–57.

6. Падалка Г.И., Долгов П.П., Алтунин А.А. Подход к построению робототехнических систем для работы в космосе // Там же. 2013. № 4 (9). С. 92–94.

Padalka G.I., Dolgov P.P., Altunin A.A. Approach to designing robotic systems to work in space // Ibid. 2013. V. 4 (9). P. 92–94.

7. Ярополов В.И. Анализ особенностей лунной экспедиции и разработка предложений по обеспечению безопасности экипажа при выполнении миссий к Луне // Там же. 2013. № 1 (6). С. 44–65.

Yaropolov V.I. Analysis of lunar expedition peculiarities and proposals for crew safety during flight to the Moon // Ibid. 2013. V. 1 (6). P. 44–65.

8. Крикалёв С.К., Крючков Б.И., Харламов М.М. и др. Экспериментальные исследования по оценке выполнения космонавтами сложной операторской деятельности после длительного космического полета на МКС в интересах осуществления полетов в дальний космос // Там же. 2013. № 4 (9). С. 24–35.
- Krikalev S.K., Kryuchkov B.I., Kharlamov M.M. et al. Experimental assessment of carrying out complex operator activity by cosmonauts after long-duration mission aboard the ISS in the interests of human space exploration beyond low-earth orbit // Ibid. 2013. V. 4 (9). P. 24–35.
9. Барыльник Д.В., Пятибратов Г.Я., Кравченко О.А. Силокомпенсирующие системы с электроприводами переменного тока тренажерных комплексов подготовки космонавтов. Новочеркасск, 2012.
- Baryl'nik D.V., Pyatibratov G.Ya., Kravchenko O.A. Force-compensating system with electric drives of alternating current simulators training complexes of cosmonauts. Novocherkassk, 2012.
10. Козловская И.Б., Томиловская Е.С., Рукавишников И.В. и др. Исследование состояния сенсомоторной системы и функциональной работоспособности после длительных космических полетов. Первые результаты эксперимента «Полевой тест» // Матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. «Пилотируемые полеты в космос». Звездный городок, 2015. С. 417–418.
- Kozlovskaya I.B., Tomilovskaya E.S., Rukavishnikov I.V. et al. Study of the state of the sensorimotor system and functional performance after long space flights. The first results of the «Field Test» experiment // Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Pilotiruemye polety v kosmos». Zvezdny gorodok, 2015. P. 417–418.
11. Мотиенко А.И., Ронжин А.Л., Павлюк Н.А. Современные разработки аварийно-спасательных роботов: возможности и принципы их применения // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 60. № 3. С. 147–165.
- Motienko A.I., Ronzhin A.I., Pavlyuk N.A. The modern development of rescue robots, opportunities and principles of their application // Nauchny vestnik NGTU. 2015. V. 3 (60). P. 147–165.
12. Motienko A.I., Ronzhin A.L., Basov O.O., Zelezny M. Modeling of injured position during transportation based on Bayesian belief networks // Proc. of the First International Scientific Conference «Intelligent Information Technologies for Industry» (IITI'16). 2016. P. 81–88.
13. Theobald D., Allen T. Apparatus with hydraulic power module. [Электронный ресурс]. U.S. Patent № 9387895. 2016. URL: <https://www.google.com/patents/US9387895> (дата обращения: 21.05.2017).
14. Theobald D. Mobile reconfigurable robot module. [Электронный ресурс]. U.S. Patent № 8106616. 2012. URL: <http://www.google.com/patents/US8106616> (дата обращения: 21.05.2017).
15. Walker I.D., Choset H., Chirikjian G.S. Snake-like and continuum robots // Springer Handbook of Robotics. 2016. P. 481–498.
16. Ota K. RoboCue, the Tokyo fire department's rescue-bot // Popular Science Magazine. 2011. P. 2011–2113.
17. Haynes G.C. et al. Developing a robust disaster response robot: CHIMP and the robotics challenge // J. of Field Robotics. 2017. V. 34. № 2. P. 281–304.
18. Kuindersma S. et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the Atlas humanoid robot // Autonomous Robots. 2016. V. 40. № 3. P. 429–455.
19. Lim J., Lee I., Shim I. et al. Robot system of DRC-HUBO+ and control strategy of team KAIST in DARPA robotics challenge finals. [Электронный ресурс] // J. of Field Robotics. 2016. URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.21673/full> (дата обращения: 15. 05.2017). DOI: 10.1002/rob.21673.
20. Zhang Y., Luo J., Hauser K. et al. Motion planning and control of ladder climbing on DRC-HUBO for DARPA Robotics Challenge // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014). 2014. P. 2086. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907139.
21. Zucker M., Joo S., Grey M.X. et al. A general-purpose system for teleoperation of the DRC-HUBO humanoid robot // J. of Field Robotics. 2015. V. 32. № 3. P. 336–351. DOI: 10.1002/rob.21570.

Поступила 30.06.2017

## USE OF RESCUE ROBOTS IN OFF-NOMINAL MEDICAL SITUATIONS DURING EXTRAVEHICULAR ACTIVITIES ON THE MOON SURFACE

**Polyakov A.V., Altunin A.A., Kryuchkov B.I., Motienko A.I., Ronzhin A.L., Usov V.M.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 34–41

*The present Moon exploration concept encompasses utilization of robotics. Since it cannot be excluded that during an extravehicular activity (EVA) on the Moon a crewmember may become unwell and lose performance, worthwhile is a discussion of increasing the strength and functionality of robotics for emergency evacuation of the disabled crewmember to the airlock.*

*The paper puts together facts derived from analysis of the existing rescue robots used at disaster sites. This information is crucial for updating the medical-engineering specifications for EVA rescue robots, and robotic systems assisting in quick emergency estimation and decision-making.*

Key words: extravehicular activity, Moon surface, off-nominal event, loss of performance, evacuation to the rover, rescue robot.



УДК 619:615.015.4

## ФАРМАКОКИНЕТИКА ВЕРАПАМИЛА И ГЕМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ В УСЛОВИЯХ АНТИОРТОСТАТИЧЕСКОЙ ГИПОКИНЕЗИИ

Богомолов В.В.<sup>1</sup>, Кондратенко С.Н.<sup>2</sup>, Поляков А.В.<sup>1</sup>, Ковачевич И.В.<sup>1</sup>, Репенкова Л.Г.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации

E-mail: repenkova@imbp.ru

Цель работы – изучение фармакокинетики антагониста ионов кальция – верапамила (в однократной дозе 80 мг), а также исследование ряда гемодинамических показателей у 9 добровольцев, находящихся в условиях обычной жизнедеятельности (1-я серия) и на 2-е сутки антиортостатической гипокинезии (АНОГ) с углом наклона -8° (2-я серия). Концентрацию верапамила в плазме крови добровольцев определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием. Гемодинамические показатели: частота сердечных сокращений (ЧСС), минутный объем сердца (МОС), ударный объем сердца (УОС), сердечный индекс (СИ), общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС) – оценивали с помощью метода интегральной реографии по М.И. Тищенко с применением регистрирующей аппаратуры «Мингограф-410», артериальное давление (АД) измеряли по методу Короткова. Изучение фармакокинетики верапамила в обеих сериях исследований показало, что усредненные профили фармакокинетических кривых идентичны и статистически достоверно не различаются, при этом фармакокинетические показатели препарата сопоставимы по своим значениям. Анализ основных гемодинамических показателей в проведенных исследованиях продемонстрировал, что наиболее общей реакцией на прием верапамила в обеих сериях исследований было повышение ЧСС (через 1 ч после приема препарата), а во 2-й серии было отмечено кратковременное увеличение МОС и уменьшение ОПСС через 1 ч после приема препарата. Выявленные изменения гемодинамики не носили патологического характера и находились в рамках физиологических колебаний для здоровых лиц, также не было отмечено изменений фармакокинетики препарата.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать препарат верапамил для проведения рациональной фармакотерапии при возможном развитии сердечно-сосудистых заболеваний в условиях пилотируемых космических полетов.

Ключевые слова: фармакокинетика, антиортостатическая гипокинезия, гемодинамика, верапамил.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 42–47.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-42-47

Пребывание человека в условиях микрогравитации сопровождается изменением функционирования многих систем организма, в том числе и сердечно-сосудистой (ССС).

В ряду вероятных расстройств кардиологического профиля особое место занимают разнообразные нарушения сердечного ритма, гипертензивные реакции, изменения конечной части желудочкового комплекса, регистрируемые при ЭКГ-исследовании. Возникновение указанных изменений может повышать медицинские риски, угрожать здоровью и жизни человека в космическом полете (КП) [1].

В связи с этим актуальной является задача поиска оптимальных с точки зрения космической медицины фармакологических средств лечения острых заболеваний кардиологического профиля.

Трудности в выборе наиболее оптимальных для применения в реальных КП сердечно-сосудистых препаратов связаны с тем, что их фармакодинамика и фармакокинетика могут претерпевать существенные изменения в условиях микрогравитации. Любое из указанных изменений может оказывать существенное влияние на фармакокинетику лекарственных средств, применяемых в условиях полета с лечебно-профилактическими целями, что может потребовать коррекции схем их применения.

Имеющиеся в литературе немногочисленные исследования фармакокинетических параметров в условиях кратковременных КП и модельных экспериментов подтверждают правомерность такого предположения [2, 3].

Учитывая, что в ходе КП могут возникать различные нарушения сердечно-сосудистого профиля актуальными являются систематические исследования особенностей фармакокинетики различных групп сердечно-сосудистых препаратов, в частности, лекарственных средств из группы антагонистов ионов кальция, в процессе их апробации в условиях, моделирующих воздействие некоторых факторов КП.

В связи с тем что в условиях микрогравитации происходит перераспределение жидких сред организма в краниальном направлении, оказывающее



влияние на гемодинамику в целом, то целесообразно фармакокинетические исследования сочетать с изучением показателей состояния сердечно-сосудистой системы (ССС).

Целью данной работы являлось изучение фармакокинетики одного из группы антагонистов ионов кальция – верапамила, а также оценка ряда гемодинамических показателей у здоровых добровольцев, находящихся в условиях антиортостатической гипокинезии (АНОГ).

### Методика

Исследования были осуществлены с участием 9 практически здоровых лиц (мужчины), в антропометрических показателях которых не было обнаружено выраженных различий (возраст  $34,33 \pm 2,62$  года, масса тела  $75,11 \pm 1,54$  кг, рост  $176 \pm 0,02$  см) с использованием одной из моделей, воспроизводящей некоторые эффекты микрогравитации (7-суточной АНОГ с углом наклона  $-8^\circ$ ).

Все добровольцы были ознакомлены с методикой исследований, от каждого из участников было получено Информированное согласие; клинко-физиологические исследования с участием добровольцев были одобрены ученым советом ИМБП МЗ СССР и выполнены в период 1988–1990 гг. В ходе исследований были выполнены 2 последовательные серии (1-я серия – до начала АНОГ, в условиях обычного двигательного режима; 2-я – на 2-е сутки АНОГ). Между окончанием 1-й и началом 2-й серий исследований был сделан перерыв в течение 7 сут.

Для исследования в этих сериях был использован препарат из группы антагонистов ионов кальция – верапамил (финоптин, производство «Орион Фармацевтика», Финляндия). За 5 сут до начала и в течение исследований запрещали прием каких-либо лекарственных препаратов (кроме исследуемого верапамила) или биологически активных добавок.

В указанных сериях проводили исследования по стандартному протоколу: натощак утром, после установки в кубитальную вену тефлоновой браунюли, брали исходную, фоновую пробу крови. Затем проводился пероральный прием верапамила в разовой дозе 80 мг строго в одно и то же время (за 1 ч до еды), препарат запивался 100 мл кипяченой воды комнатной температуры. Кровь для анализа отбирали из кубитальной вены в гепаринизированные пробирки до и через 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 8 ч после приема препарата. Плазму крови отделяли центрифугированием и хранили при  $-20^\circ\text{C}$  до проведения анализа. Концентрацию верапамила в плазме крови определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с флуориметрическим детектированием [4] при длине волны возбуждения 203 нм, длине волны эмиссии 320 нм. Изолирование верапамила из плазмы крови осуществляли методом жидкофазной

экстракции с использованием в качестве экстрагента гептана, реэкстрагента – разбавленного раствора серной кислоты. Эффективность экстракции составляла 84 %. Количественное определение проводили методом абсолютной калибровки. Предел детектирования верапамила составлял 2 нг/мл плазмы, а коэффициент регрессии  $r^2 = 0,9954$ .

Полученные данные анализировали с помощью программы M-IND [5] для персонального компьютера, рассчитывая модельно-независимые параметры: максимальную концентрацию  $C_{\max}$ , время ее достижения  $T_{\max}$ , площадь под кривой концентрация – время  $AUC_{0-\infty}$ , общий клиренс  $Cl_t$ , среднее время удерживания препарата в организме MRT, период полуэлиминации  $T_{1/2}$  и объем распределения  $V_z$ . Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью программы InStat для персонального компьютера, рассчитывали среднее арифметическое по группе (Mean), стандартная ошибка (S.D.), стандартное отклонение среднего результата (S.E.) и коэффициент вариации (C.V., %).

Состояние гемодинамических показателей: частота сердечных сокращений (ЧСС), ударный объем сердца (УОС), минутный объем сердца (МОС), сердечный индекс (СИ), общее периферическое сопротивление сосудов (ОПСС) оценивали с помощью метода интегральной реографии по М.И. Тищенко с применением регистрирующей аппаратуры «Мингограф-410», кроме того, измеряли артериальное давление (АД) (систолическое и диастолическое) по методу Короткова.

Полученные результаты обрабатывали стандартными методами вариационной статистики с использованием компьютерных программ. Достоверность различия оценивали методом парной параметрической и непараметрической статистики при 5%-ном уровне значимости.

### Результаты и обсуждение

Динамика средних значений концентрации верапамила в плазме крови добровольцев после приема препарата в однократной дозе 80 мг в условиях обычной жизнедеятельности (1-я серия) представлена на рис. 1.

Максимальный уровень верапамила в плазме крови достигался в среднем через 2 ч после приема препарата и составил  $40,9 \pm 13,5$  нг/мл. Через 8 ч после приема верапамил еще регистрировался в плазме крови добровольцев ( $8,2 \pm 2,5$  нг/мл). В 1-й серии исследований наблюдался значительный разброс индивидуальных значений концентрации препарата в плазме крови добровольцев – 60–118 %.

Значения фармакокинетических параметров верапамила приведены в табл. 1. Как следует из представленной таблицы, препарат после перорального приема относительно быстро всасывался

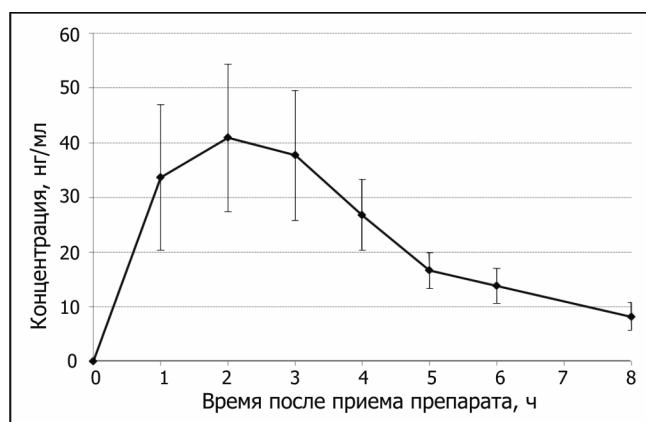


Рис. 1. Динамика концентрации верапамила в плазме крови добровольцев после однократного приема 80 мг препарата в 1-й серии исследований (Mean ± S.E.)

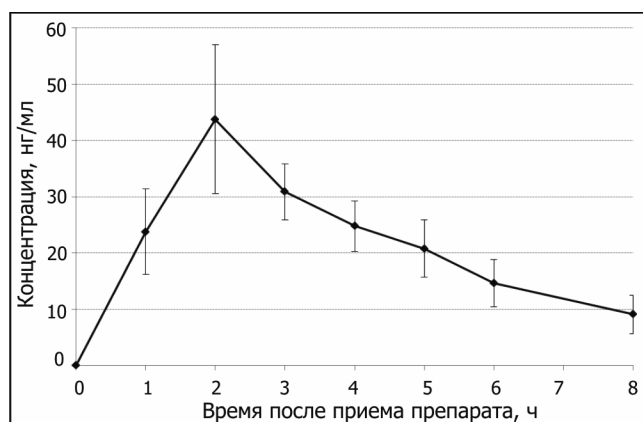


Рис. 2. Динамика концентрации верапамила в плазме крови добровольцев после однократного приема 80 мг препарата во 2-й серии исследований (Mean ± S.E.)

Таблица 1

**Фармакокинетические параметры верапамила после приема его в дозе 80 мг в 1-й серии исследований**

| Параметры | $C_{max}$ , нг/мл | $T_{max}$ , ч | $AUC_{0-\infty}$ , нг·ч/мл | $Cl_r$ , л/ч | $T_{1/2}$ , ч | MRT, ч | $V_z$ , л |
|-----------|-------------------|---------------|----------------------------|--------------|---------------|--------|-----------|
| Mean      | 46,9              | 2,36          | 240,0                      | 628,0        | 3,72          | 5,97   | 3033,0    |
| S.D.      | 40,8              | 0,87          | 192,0                      | 243,0        | 1,59          | 2,01   | 2688,0    |
| S.E.      | 13,6              | 0,29          | 64,0                       | 81,0         | 0,53          | 0,67   | 896,0     |
| C.V.      | 87,0              | 36,9          | 80,0                       | 38,7         | 42,7          | 33,7   | 88,6      |

Таблица 2

**Показатели центральной гемодинамики при приеме 80 мг верапамила в 1-й серии исследований ( $M \pm m$ )**

| Показатель                                  | Период наблюдения |               |               |               |               |               |               |               |
|---------------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                             | До приема         | Через 1 ч     | Через 2 ч     | Через 3 ч     | Через 4 ч     | Через 5 ч     | Через 6 ч     | Через 8 ч     |
| МОС, л/мин                                  | 7,30 ± 0,59       | 7,90 ± 0,58   | 7,20 ± 0,43   | 7,30 ± 0,55   | 6,90 ± 0,45   | 6,50 ± 0,30   | 7,70 ± 0,40   | 7,00 ± 0,49   |
| УОС, л                                      | 0,128 ± 0,011     | 0,125 ± 0,011 | 0,116 ± 0,007 | 0,123 ± 0,008 | 0,119 ± 0,009 | 0,115 ± 0,007 | 0,118 ± 0,008 | 0,123 ± 0,008 |
| СИ, л/мин/м <sup>2</sup>                    | 3,8 ± 0,23        | 4,2 ± 0,41    | 3,8 ± 0,20    | 3,8 ± 0,30    | 3,60 ± 0,003  | 3,40 ± 0,18   | 3,50 ± 0,21   | 3,60 ± 0,29   |
| ОПСС, дин/см <sup>-1</sup> /с <sup>-5</sup> | 1063,9 ± 44,5     | 956,0 ± 58,7  | 1047,4 ± 49,2 | 1043,8 ± 78,7 | 1095,4 ± 69,5 | 1168,5 ± 79,1 | 1130,0 ± 64,0 | 1088,3 ± 92,5 |
| ЧСС, уд/мин                                 | 58,0 ± 2,4        | 64,0 ± 3,0*   | 62,0 ± 2,9    | 60,0 ± 2,3    | 59,0 ± 2,3    | 58,0 ± 2,5    | 58,0 ± 2,3    | 57,0 ± 2,7    |
| АД сист., мм рт. ст.                        | 120,0 ± 1,7       | 120,0 ± 2,4   | 119,0 ± 2,4   | 120,0 ± 1,9   | 121,0 ± 2,0   | 122,0 ± 2,9   | 120,0 ± 2,0   | 119,0 ± 2,4   |
| АД диаст., мм рт. ст.                       | 74,0 ± 2,6        | 71,0 ± 2,9    | 73,0 ± 2,4    | 73,0 ± 2,4    | 71,0 ± 2,4    | 72,0 ± 2,3    | 73,0 ± 2,9    | 7,0 ± 2,7     |

Примечание. Здесь и в табл. 4: \* –  $p < 0,05$  по сравнению с периодом до приема верапамила.

Таблица 3

**Фармакокинетические параметры верапамила после приема его в дозе 80 мг во 2-й серии исследований**

| Параметры | $C_{max}$ , нг/мл | $T_{max}$ , ч | $AUC_{0-\infty}$ , нг·ч/мл | $Cl_r$ , л/ч | $T_{1/2}$ , ч | MRT, ч | $V_z$ , л |
|-----------|-------------------|---------------|----------------------------|--------------|---------------|--------|-----------|
| Mean      | 58,0              | 2,63          | 300,0                      | 382,0        | 4,32          | 7,63   | 1416,0    |
| S.D.      | 36,0              | 1,26          | 231,0                      | 210,0        | 6,54          | 8,49   | 1395,0    |
| S.E.      | 12,0              | 0,42          | 77,0                       | 70,0         | 2,18          | 2,83   | 465,0     |
| C.V.      | 62,1              | 47,9          | 77,0                       | 55,0         | 151,4         | 111,3  | 98,5      |

Таблица 4

**Показатели центральной гемодинамики при приеме 80 мг верапамила во 2-й серии исследований (в условиях АНОГ) ( $M \pm m$ )**

| Показатель                               | Период наблюдения |               |               |               |                |                |                |                |
|------------------------------------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                          | До приема         | Через 1 ч     | Через 2 ч     | Через 3 ч     | Через 4 ч      | Через 5 ч      | Через 6 ч      | Через 8 ч      |
| МОС, л/мин                               | 6,70 ± 0,28       | 8,20 ± 0,45*  | 7,70 ± 0,55   | 7,50 ± 0,54   | 7,00 ± 0,44    | 7,20 ± 0,37    | 7,40 ± 0,42    | 7,00 ± 0,28    |
| УОС, л                                   | 0,127 ± 0,009     | 0,134 ± 0,007 | 0,127 ± 0,011 | 0,129 ± 0,010 | 0,1260 ± 0,010 | 0,1290 ± 0,010 | 0,1230 ± 0,009 | 0,122 ± 0,008  |
| СИ, л/мин/м²                             | 3,50 ± 0,95       | 4,20 ± 0,64   | 4,00 ± 0,19   | 3,90 ± 0,35   | 3,60 ± 0,29    | 3,80 ± 0,12    | 3,90 ± 0,26    | 3,60 ± 0,14    |
| ОПСС, $\text{дин/см}^{-1}/\text{с}^{-5}$ | 1092,6 ± 39,1     | 905,0 ± 45,0* | 951,0 ± 61,4  | 968,4 ± 60,5  | 1122,8 ± 81,1  | 1038,5 ± 55,5  | 1009,9 ± 53,9  | 1055,4 ± 40,32 |
| ЧСС, уд/мин                              | 55,0 ± 2,1        | 61,0 ± 3,0*   | 61,0 ± 2,5*   | 59,0 ± 1,9*   | 57,0 ± 2,4     | 57,0 ± 2,0     | 61,0 ± 2,4*    | 59,0 ± 3,0     |
| АД сист., мм рт. ст.                     | 115,0 ± 4,0       | 117,0 ± 3,3   | 115,0 ± 2,7   | 115,0 ± 4,1   | 116,0 ± 1,8    | 119,0 ± 2,3    | 117,0 ± 2,4    | 118,0 ± 4,1    |
| АД диаст., мм рт. ст.                    | 74,0 ± 1,4        | 72,0 ± 2,4    | 71,0 ± 2,5    | 70,0 ± 1,0    | 70,0 ± 2,4     | 73,0 ± 2,5     | 73,0 ± 1,3     | 73,0 ± 1,7     |

в системный кровоток. Полученные результаты в целом согласуются с результатами исследований других авторов, проводивших фармакокинетические исследования верапамила [6].

Данные, полученные при параллельном изучении ряда показателей гемодинамики в 1-й серии исследований при проведении однократного приема 80 мг верапамила, представлены в табл. 2. Как следует из таблицы, под влиянием приема верапамила происходило кратковременное изменение ЧСС, достоверное увеличение которой было зафиксировано через 1 ч после приема препарата. Остальные гемодинамические параметры, в том числе и АД, не претерпевали значимых изменений, практически оставаясь на уровне исходных значений.

Результаты, полученные при изучении концентрации верапамила в плазме крови добровольцев на 2-е сутки АНОГ (2-я серия исследований), представлены на рис. 2.

В этой серии исследований максимальный уровень верапамила в плазме ( $43,8 \pm 13,2$  нг/мл) также регистрировался через 2 ч. Через 8 ч после приема препарат обнаруживался в плазме крови ( $9,1 \pm 3,4$  нг/мл). На 2-е сутки АНОГ так же, как и в 1-й серии исследований, наблюдался значительный

разброс индивидуальных значений концентрации препарата в плазме добровольцев – 49–112 %. Анализируя усредненные фармакокинетические кривые в 1-й и 2-й сериях исследований, необходимо отметить, что их профили идентичны и статистически достоверно не различаются.

В табл. 3 приведены значения фармакокинетических показателей верапамила во 2-й серии исследований (на 2-е сутки АНОГ). Из представленных данных следует, что исследуемый препарат в условиях АНОГ, так же как и в 1-й серии исследований, довольно быстро всасывался в системный кровоток, а значение времени достижения максимальной концентрации ( $T_{max}$ ) было сопоставимо с таковым в 1-й серии исследований. В условиях АНОГ наблюдался довольно значительный разброс индивидуальных значений фармакокинетических параметров по сравнению с данными, полученными в 1-й серии исследований. Следует отметить, что во 2-й серии исследований значения фармакокинетических показателей были практически идентичны данным, полученным в 1-й серии исследований.

Средние значения показателей центральной гемодинамики при приеме верапамила в дозе 80 мг во 2-й серии (на 2-е сутки АНОГ) приведены в табл. 4.

Как следует из полученных данных, в течение 2-й серии исследований (после приема 80 мг верапамила) было отмечено достоверное повышение ЧСС через 1, 2, 3 и 6 ч после приема препарата, при этом МОС достоверно увеличивался через 1 ч после приема препарата, а ОПСС в это время достоверно снижался.

Таким образом, наиболее общей реакцией, отмечаемой при приеме 80 мг верапамила в проведенных исследованиях, было повышение ЧСС, наблюдаемое через 1 ч после приема препарата.

В то же время во 2-й серии исследований в отличие от 1-й серии было отмечено более длительное сохранение увеличения ЧСС, которое наблюдалось через 2, 3 и 6 ч после приема верапамила, а также достоверное увеличение МОС и снижение ОПСС, наблюдаемое через 1 ч после приема препарата. В наших наблюдениях у здоровых добровольцев не было выявлено снижения сократительной способности миокарда, так как ни в одной из серий наблюдений не было отмечено значимых изменений УОС. Увеличение МОС через 1 ч после приема препарата во 2-й серии исследований являлось, скорее всего, следствием сопутствующего увеличения ЧСС (т.е. положительного хронотропного эффекта), а не повышения УОС.

Более выраженные изменения гемодинамических показателей (повышение ЧСС в течение нескольких часов, увеличение МОС и уменьшение ОПСС через 1 ч после приема верапамила) в условиях АНОГ, по-видимому, связаны с тем, что гемодинамический эффект препарата реализовался на фоне перемещения жидких сред организма в краиниальном направлении.

Как известно, верапамил относится к группе блокаторов кальциевых каналов (БКК) и является одним из основных лекарственных средств, применяемых в разных клинических ситуациях, позволяя устранять симптомы многих сердечно-сосудистых заболеваний. Общим механизмом действия лекарственных препаратов из этой группы является торможение тока ионов кальция в гладкомышечные клетки сосудов, что способствует снижению ОПСС и артериальной дилатации с последующим антигипертензивным эффектом. При этом препарат эффективно снижает как систолическое, так и диастолическое АД [7, 8].

Однако в проводимых исследованиях АД оставалось стабильным, что согласуется с данными ряда авторов, которые сообщали, что выраженный гемодинамический эффект воздействия препарата на АД проявляется только при наличии артериальной гипертензии [9]. В обеих сериях исследований наиболее общей реакцией на прием верапамила явилось увеличение ЧСС у добровольцев. О возможности развития такой реакции свидетельствуют клинические наблюдения [9].

Следует отметить, что выявленные изменения ряда гемодинамических показателей при приеме верапамила не носили патологического характера и находились в рамках физиологических колебаний для здоровых лиц. Кроме того, значения фармакокинетических показателей препарата, рассчитанные для 2-й серии, практически не отличались от таковых в 1-й серии исследований, что позволяет считать, что процессы всасывания, распределения и элиминации верапамила в 1-й и 2-й сериях исследований не подвергались существенным изменениям.

Полученные результаты дают основание считать, что применение верапамила в условиях микрогравитации не будет сопровождаться выраженными нарушениями гемодинамики и изменениями фармакокинетики препарата, что, в свою очередь, позволяет рекомендовать указанный препарат для проведения рациональной фармакотерапии при возможном развитии сердечно-сосудистых заболеваний в условиях пилотируемых КП.

#### Выводы

1. Изучение фармакокинетики верапамила на 2-е сутки АНОГ (2-я серия) не выявило статистически значимых изменений фармакокинетических показателей по сравнению с данными, полученными в обычных условиях жизнедеятельности (1-я серия).
2. Исследование основных гемодинамических показателей в обычных условиях жизнедеятельности (1-я серия) и на 2-е сутки АНОГ (2-я серия) продемонстрировало, что наиболее характерным ответом на прием верапамила (в однократной дозе 80 мг) в обеих сериях исследований было повышение ЧСС (через 1 ч после приема препарата). Во 2-й серии (в отличие от 1-й серии) было отмечено кратковременное увеличение МОС и уменьшение ОПСС через 1 ч после приема препарата. Выявленные изменения гемодинамики не носили патологического характера и находились в рамках физиологических колебаний для здоровых лиц.

#### Список литературы

1. Grigoriev A.I. General mechanisms of the effects of weightlessness on the human // *Advances in space biology and medicine* / S.L. Bonting, ed. 1992. London, V. 2. P. 1–42.
2. Putcha L., Cintron N.M. Pharmacokinetic consequences of space flight // *Ann. NY Acad. Sci. Meet.* 1991. P. 615–618.
3. Goncharov I.B., Kovachevich I.V., Repenkova L.G. et al. Effect of antiorthostatic hypokinesia on acetaminophen pharmacokinetics and its distribution in saliva of healthy



volunteers // Pharmac. Chemistry J. 2009. V. 43. № 5. P. 235–238.

4. Кукес В.Г., Грачев С.В., Сычев Д.А. и др. Метаболизм лекарственных средств. Научные основы персонализированной медицины: руководство для врачей. М., 2008.

Kukes V.G., Grachev S.V., Sychev D.A. et al. Metabolism of medication. Scientific foundations of personalized medicine: Handbook for doctors. Moscow, 2008.

5. Агафонов А.А., Пиотровский В.К. Программа M-IND оценки системных параметров фармакокинетики модельно-независимым методом статистических моментов // Хим.-фарм. журн. 1991. Т. 25. № 10. С. 16–19.

Agafonov A.F., Piotrovskiy V.K. M-IND program evaluation system parameters pharmacokinetic model independent method of statistical moments HPLC // Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal. 1991. V. 25. № 10. P. 16–19.

6. Мирошниченко И.И., Тюляев И.И., Зувев А.П. Биодоступность лекарственных средств. М., 2003.

Miroshnichenko I.I., Tyulyaev I.I., Zuev A.P. Bioavailability of drugs. Moscow, 2003.

7. Stadler P., Leonardi L., Riesen W. et al. Cardiovascular effects of verapamil in essential hypertension // Clin. Pharmacol. Ther. 1987. V. 42. P. 485–492.

8. Speders S., Sosna J., Schumacher A. et al. Efficacy and tolerability of Isoptin SR in essential hypertension // Hochdruck. 1988. V. 8. P. 3–14.

9. Голиков А.П., Рябинин В.А., Соколов А.М. Некоторые особенности влияния верапамила на кровообращение // Клиническая медицина. 1986. Т. 64. № 8. С. 31–35.

Golikov A.P., Ryabinin V.A., Sokolov A.M. Some features of the influence of verapamil on blood circulation // Klinicheskaya meditsina. 1986. V. 64. № 8. P. 31–35.

Поступила 05.06.2017

## PHARMACOKINETICS OF VERAPAMIL AND HEMODYNAMIC INDICES DURING HEAD-DOWN BED REST

**Bogomolov V.V., Kondratenko S.N., Polyakov A.V., Kovachevich I.V., Repenkova L.G.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 42–47

*Purpose of the work was to study pharmacokinetics of Ca ions antagonist Verapamil (a single 80 mg dose) and hemodynamics in 9 volunteers with normal life activities (experiment-1) and on the second day of head-down (-8°) bed rest (experiment-2). Plasma concentration of Verapamil was determined using high-performance liquid chromatography with fluorometric detection. Heart rate (HR), cardiac output (CO), stroke volume (SV) and general peripheral vascular resistance (GPVR) were measured using integral rheography according to M. Tishchenko (Mingograf-410, Russia); blood pressure (BP) was measured by Korotkov's tones. Analysis of Verapamil pharmacokinetics in both experiments showed identity of the averaged curve profiles that did not differ reliably. Pharmacokinetic parameters were comparable. Based on hemodynamics analysis, HR elevation in one hour after Verapamil administration was the most common reaction in both experiments; a short CO rise and GPVR decrease were observed in experiment-2 in one hour after administration. These hemodynamic shifts were not pathologic and did not deviate from the physiological range in healthy people; changes in Verapamil pharmacokinetics also were not detected.*

*These findings provide the grounds to recommend Verapamil for rational pharmacotherapy of cardiovascular diseases that may develop in piloted space missions.*

**Key words:** pharmacokinetics, head-down bed rest, hemodynamics, Verapamil.

УДК 612.15.1

## ВЛИЯНИЕ «СУХОЙ» ИММЕРСИИ НА КРОВОТОК ПО ЯРЕМНЫМ ВЕНАМ И ЦЕРЕБРАЛЬНОМУ ВЕНОЗНОМУ СИНУСУ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Морева Т.И.<sup>1</sup>, Криушев Е.С.<sup>1</sup>, Морева О.В.<sup>2</sup>, Пасекова О.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Российский кардиологический научно-производственный комплекс Минздрава России, Москва

E-mail: moreva1008@yandex.ru

*В эксперименте с 3-суточной «сухой» иммерсией проведено исследование венозного кровообращения головного мозга. Целью исследования явилось изучение влияния факторов микрогравитации на венозный отток из полости черепа. Методом дуплексного сканирования и ультразвуковой доплерографии регистрировали гемодинамические параметры магистральных вен шеи, орбиты и церебрального венозного синуса. Выявлено значительное снижение кровотока по югулярному пути с активацией дополнительных путей как экстра-, так и интракраниальных отделов венозной системы головного мозга. Полученные результаты свидетельствуют о включении механизмов, способных компенсировать повышение венозного внутричерепного давления в условиях действия факторов микрогравитации. У некоторых обследуемых не происходило ускорения внутричерепного венозного кровотока, что может быть обусловлено анатомическими особенностями и требует дополнительного обследования венозной системы данных субъектов.*

Ключевые слова: венозный отток, внутренняя яремная вена, площадь поперечного сечения, прямой синус, югулярный путь, вертебральный путь, ультразвуковое исследование кровотока.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 48–53.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-48-53

«Сухая» иммерсия является удовлетворительной моделью различных физиологических эффектов микрогравитации [1]. Однако в доступной литературе отсутствуют сведения, касающиеся комплексного изучения венозной церебральной гемодинамики, которые включали бы исследование различных путей оттока крови из черепа в условиях «сухой» иммерсии. Ранее при помощи ультразвуковой доплерографии была показана динамика кровотока по прямому синусу в условиях «сухой» иммерсии [2].

Целью данного исследования явилось изучение влияния микрогравитации на венозное кровообращение головного мозга. В задачи исследования входила регистрация линейной скорости кровотока (ЛСК) по внутренней яремной вене (ВЯВ), верхней глазничной

вене (ВГВ) и одном из самых крупных венозных коллекторов, принимающем кровь от глубоких структур головного мозга, – прямом синусе (ПС), а также изменение диаметра и площади ВЯВ в условиях 3-суточной «сухой» иммерсии у здоровых обследуемых до, во время и после прекращения воздействия.

### Методика

В 3-суточной горизонтальной водной «сухой» иммерсии приняли участие 13 мужчин, средний возраст которых составил  $22,0 \pm 2,1$  года. Все добровольцы прошли медицинскую комиссию ГНЦ РФ – ИМБП РАН. Процедуры и методики исследований были рассмотрены Комиссией по биомедицинской этике при ГНЦ РФ – ИМБП РАН, протокол № 302 от 25 июля 2012 г. От обследуемых получено добровольное письменное Информированное согласие. Венозный кровоток на шее исследовали по следующей схеме: на переднебоковой поверхности шеи на уровне подъязычной дуги линейным датчиком 12 МГц через гелевую «подушку» лоцировали ВЯВ. Вену идентифицировали по ее расположению кнаружи от общей сонной артерии, реакции на дыхательные циклы и коллапсированию при легкой компрессии датчиком. Убедившись, что получен сигнал от ВЯВ, при спокойном дыхании измеряли ее диаметр в продольном и поперечном сечениях. Поскольку форма просвета ВЯВ более всего приближалась к овалу, измеряли 2 диаметра – большой ( $D_1$ ) и малый ( $D_2$ ). Площадь поперечного сечения (ППС) вычисляли по формуле площади овала:  $\frac{1}{2} D_1 \times \frac{1}{2} D_2 \times 3,14$ . Морфологию ВЯВ оценивали, учитывая критерии, разработанные в исследованиях [3]: при обнаружении площади одной из ВЯВ, превышающей на 50 % площадь другой ВЯВ, считали их асимметричными у данного обследуемого; при получении ППС обеих ВЯВ менее  $0,4 \text{ см}^2$  считали ВЯВ узкими; при ППС обеих ВЯВ более  $0,4 \text{ см}^2$  считали ВЯВ широкими. На этом же уровне с помощью ультразвукового доплера измеряли линейную скорость кровотока (ЛСК) по обеим ВЯВ.

Венозный отток от глазницы оценивали, измеряя ЛСК верхней глазничной вены (ВГВ). Исследование проводили при закрытых глазах обследуемого, помещая датчик 8 мГц в медиальный угол глазницы, направляя его внутрь орбиты и получая по возможности устойчивый сигнал от ВГВ, избегая компрессии вены с помощью гелевой «подушки». Глазничная артерия, сигнал от которой хорошо лоцируется, располагается рядом с ВГВ и служит ориентиром для идентификации ВГВ. Внутрочерепную венозную систему головного мозга исследовали, лоцируя прямой синус (ПС) датчиком 2 мГц через ультразвуковое окно ниже наружного затылочного бугра под отходящими от него в стороны полукруглыми гребнями справа или слева, в зависимости от получения наиболее устойчивого сигнала. Эта область более удобна для локализации прямого синуса, так как здесь кость тоньше, а угол локации меньше, в отличие от УЗ-окна на 1–3 см выше затылочного бугра, где кость толще и плотнее, а угол локации больше [4]. Идентифицировали ПС, получив направленный к датчику венозный сигнал, прослеживающийся на глубине от 50 до 60 мм без изменения его скорости на протяжении этой дистанции.

Фоновые исследования выполняли в положении добровольца лежа на спине после 5–10-минутного отдыха. Во время воздействия измерения проводили непосредственно в иммерсионной ванне без изменения положения обследуемого на 1, 2 и 3-е сутки. В периоде восстановления (ПВ) измерения проводили через 5–6 ч после выемки обследуемого из ванны. Во время исследования были исключены факторы, непосредственно влияющие на венозный кровоток: глубокие вдохи, движения, натуживания и т.п.

Динамику венозного кровотока на фоне воздействия оценивали при помощи критерия Вилкоксона. Статистически значимым считали различия при  $p < 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

При обследовании испытуемых в фоновом периоде были выявлены 3 варианта югулярного кровообращения: у 3 обследуемых обнаружена асимметрия площади поперечного сечения ВЯВ (справа больше, чем слева) более чем на 50 %, т.е. асимметричные ВЯВ. У 4 выявлена малая площадь ВЯВ с обеих сторон, т.е. узкие ВЯВ. У 6 человек ППС ВЯВ была более 0,4 см<sup>2</sup> с обеих сторон, т.е. широкие ВЯВ. ППС ВЯВ соотносились следующим образом: асимметричные/узкие/широкие как 23 % / 30,8 % / 46,2 %. Эти данные согласуются с данными других исследователей [3]. ЛСК по ВЯВ не зависели от особенностей строения ВЯВ и были в пределах от 7 до 38 см/с, в среднем по группе справа  $17,5 \pm 5,5$  и слева  $17,7 \pm 7,7$ . При исследовании ВГВ у 11 обследуемых выявлен антеградный (т.е. в полость черепа) венозный кровоток

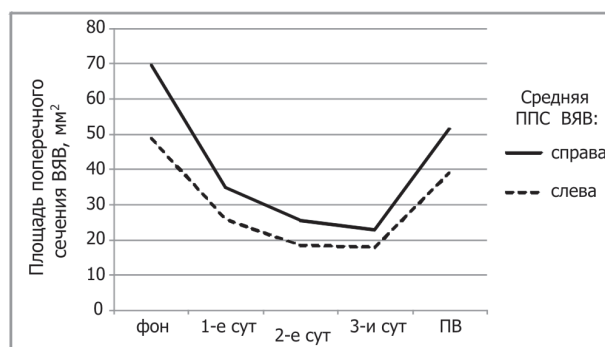


Рис. 1. Динамика площади поперечного сечения ВЯВ у здоровых молодых мужчин при 3-суточном иммерсионном воздействии

с обеих сторон. ЛСК была без выраженной асимметрии, в среднем по группе:  $4,0 \pm 2,4$  см/с справа и  $3,7 \pm 1,9$  см/с слева. У 2 обследуемых в состоянии покоя ВГВ не лоцировались, однако в процессе воздействия сигнал от ВГВ появлялся, был устойчивым и достаточным для измерения ЛСК, что расценено как реакция увеличения ЛСК по ВГВ в процессе воздействия.

При транскраниальном исследовании локация ПС была возможной у 11 человек из 13 (84,6 %), что совпадает с данными литературы [5]. ЛСК по ПС варьировала от 18 до 50 см/с, причем у половины обследуемых величины ЛСК были относительно низкими – от 18 до 25 см/с, у другой половины существенно выше – от 32 до 50 см/с. Следует отметить, что, несмотря на развитие ультразвуковых методов исследования с применением доплерографии, позволяющих неинвазивно измерить скорость кровотока по внутрочерепным сосудам, до сих пор не разработано строгих критериев значений ЛСК по ПС в норме и при патологии. Это частично объясняется сложностью локализации ПС и относительно поздним появлением интереса к венозной системе мозга. С другой стороны, исследования последних лет выявили множество вариантов развития венозной системы головного мозга, например, нередко случаи отсутствия какого-либо синуса и т.п. [6]. Поэтому полученные столь различающиеся результаты ЛСК по ПС в покое расценены как нормальные, возможно, отражающие особенности строения глубокой венозной системы головного мозга у здоровых молодых людей.

В процессе иммерсионного воздействия динамика площади поперечного сечения ВЯВ была однонаправленной у 12 обследуемых. Уже в 1-е сутки отмечалось существенное, почти в 2 раза, уменьшение ППС ВЯВ с обеих сторон, которое продолжалось на 2-е и 3-и сутки (рис. 1). У 1 обследуемого реакция кровотока была иной. Так, у него зарегистрировано увеличение ППС ВЯВ, сопровождающееся значительным ростом скорости кровотока. В периоде последствия ППС ВЯВ восстановилась у 70 % обследуемых, у 30 % полного восстановления не произошло.

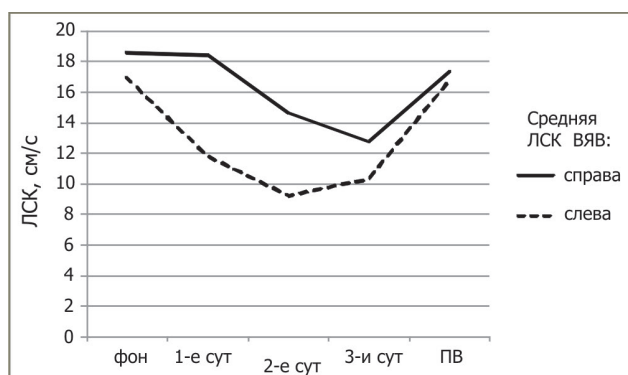


Рис. 2. Динамика линейной скорости кровотока по ВЯВ при 3-суточном иммерсионном воздействии

ЛСК по ВЯВ в 1-е сутки в среднем по группе снизилась. На 2-е сутки ЛСК уменьшилась по левой ВЯВ на 33 % ( $p = 0,001$ ), на 3-и сутки снижение ЛСК было достоверным с обеих сторон: справа на 23 % ( $p = 0,05$ ), слева на 26 % ( $p = 0,03$ ). По ВГВ достоверного изменения ЛСК не было, отмечалась тенденция к повышению на 2-е и 3-и сутки иммерсии (рис. 2).

При оценке внутричерепной венозной динамики выявилась тенденция к повышению ЛСК в 1-е сутки. В дальнейшем ЛСК достоверно увеличилась: на 15 % на 2-е сутки ( $p = 0,01$ ) и на 18 % на 3-и сутки ( $p = 0,008$ ). Однако анализ результатов каждого участника показал, что у 1 обследуемого произошло снижение ЛСК в 1-е сутки воздействия с последующим его увеличением, а у 4 обследуемых не происходило значимого увеличения, ЛСК по ПС оставалась неизменной на протяжении всего периода воздействия. Эти данные аналогичны результатам, полученным ранее в 5- и 7-суточных иммерсиях [2]. Они позволили выделить 2 типа реакции ЛСК по ПС: с увеличением ЛСК и без увеличения либо с уменьшением (рис. 3). Необходимо отметить, что тип реакции не зависел от начальной низкой либо высокой скорости кровотока по ПС.

В периоде последействия ППС левой ВЯВ восстановилась, в то время как правая ВЯВ оставалась в некотором спавшемся состоянии – на 22 % меньше фоновых значений ( $p = 0,04$ ), что может быть отражением анатомических особенностей венозной системы шеи (правая ВЯВ обычно шире левой). Скорости кровотока по ВЯВ, ВГВ и ПС вернулись к уровню фоновых величин.

В проведенном исследовании мы получили значительное снижение оттока венозной крови из полости черепа по югулярным венам у всех обследуемых и различные типы реакций внутричерепной венозной гемодинамики. Венозный кровоток в области орбиты менялся незначительно с тенденцией к ускорению. Для понимания динамики венозного кровообращения в условиях иммерсионного воздействия следует обратиться к основным закономерностям венозной

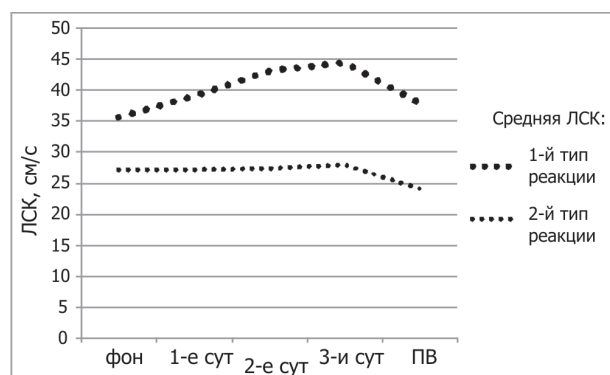


Рис. 3. Динамика ЛСК по ПС при 3-суточном иммерсионном воздействии – 2 типа реакции

циркуляции области головы и шеи. Считается, что основным путем оттока от внутричерепных структур является так называемый югулярный путь, т.е. внутренние яремные вены, которые представляют собой крупные венозные стволы диаметром от 0,5–1 до 2 см и более, проходящие по переднебоковой поверхности шеи. Однако известно, что существует и другой путь оттока – вертебральный, расположенный в толще мышц шеи ближе к позвоночнику. Установлено, что путь оттока венозной крови из полости черепа в значительной степени зависит от положения тела в пространстве: в горизонтальном положении отток осуществляется в основном через ВЯВ, а в положении стоя ВЯВ практически коллапсируют, кровоток по ним становится очень низким, почти нулевым [7]. В вертикальном положении основным путем оттока венозной крови от головного мозга становится вертебральный путь. Авторам работы с пережатием югулярных вен удалось зарегистрировать увеличение кровотока по вертебральным венам [8]. Наиболее полное и точное описание морфологии дренажной системы головного мозга было проведено в 2002 г. американскими морфологами, которые на секционном материале путем заливки вен головы и шеи получили слепок венозной системы краниоцервикальной области и установили, что она представляет собой сложную сеть сосудов различного диаметра, ориентированных как в продольном, так и в поперечном направлении, причем суммарная площадь поперечного сечения вертебрального пути оказалась больше, чем югулярного [9].

Вертебральный путь, так же как и югулярный, получает венозную кровь от головного мозга в основном через сигмовидный синус (СС). Однако имеются различия в соединении СС с ВЯВ и вертебральными венами. При рассмотрении модели венозной системы краниовертебрального перехода обращает на себя внимание то, что сигмовидный синус дренируется непосредственно в верхнюю луковичу яремной вены и далее в ВЯВ, образуя прямой путь с широким просветом, напоминающий трубу, в то время как



вертебральный путь получает венозную кровь через многочисленные вены, в основном через систему кондиллярных вен, отходящих от кондиллярного синуса ниже луковицы ВЯВ. Очевидно, что существование двух различно устроенных путей оттока обусловлено разным функционированием венозной системы в зависимости от положения тела в пространстве, однако причины такого различия морфологии и физиологии дренажной системы головного мозга неясны. Нам представляется вероятным следующий механизм: в горизонтальном положении венозная кровь от головного мозга свободно изливается в ВЯВ, которая имеет широкий просвет и относительно прямолинейный путь. Положительное давление в правых отделах сердца поддерживает достаточный уровень давления в верхней полой вене (ВПВ), вследствие чего малый градиент не позволяет венозной крови из полости черепа чрезмерно излиться в ВЯВ. В положении стоя давление в правых отделах сердца и ВПВ снижается, венозная кровь по градиенту давления должна устремиться в ВЯВ, однако верхняя ее луковица и соответственно место слияния с сигмовидным синусом в этих условиях оказывается выше, чем система кондиллярных вен, и венозная кровь по ним устремляется в вертебральную систему. В свою очередь ВЯВ запустевают. Такой механизм можно сравнить с гидротехническим устройством «слив-перелив», в котором жидкость под действием гравитационных сил стремится в расположенный ниже сосуд, т.е. в данном случае в кондиллярные вены, являющиеся эмиссарными для вертебрального пути в положении стоя. Однако «ближний» вертебральный путь оказывается сложной системой бесклапанных, но сильно разветвленных вен различного диаметра с разным направлением кровотока, и это, по-видимому, неслучайно. Такая сеть является гораздо более надежным способом предупреждения чрезмерного оттока крови из полости черепа в вертикальном положении, так как сопротивление току крови в сети гораздо выше, чем в крупном сосуде. Этот предусмотренный природой механизм является надежной защитой головного мозга от обескровливания в условиях гравитации. Возможно, филогенетически он более молодой, чем механизмы, защищающие головной мозг от повышения венозного и внутричерепного давления, так как появился в процессе эволюции при переходе человека к прямохождению, когда потребовалась защита головного мозга от чрезмерного оттока и сохранение притекшей к головному мозгу крови. Такая интерпретация может показаться довольно механистичной, однако она не противоречит законам гидро- и гемодинамики и вполне объясняет причины сложности устройства и взаимодействия двух систем венозного оттока.

В нашем исследовании значительное уменьшение площади поперечного сечения ВЯВ с замедлением скорости кровотока по ней свидетельствует о

снижении оттока по югулярному пути и, как следует из вышеуказанного, об активации вертебрального пути. Смещение оттока в сторону вертебрального пути говорит о перераспределении венозной крови в соответствии с положением тела в иммерсионной ванне, когда обследуемый, с одной стороны, находится в условиях безопорности, избегая действия гравитации, с другой стороны, все же частично подвергается ее действию.

Что касается внутричерепной венозной гемодинамики, то результаты настоящего исследования подтверждают результаты проведенных ранее исследований в 5- и 7-суточных иммерсиях. Так, увеличение скорости кровотока по ПС у половины обследуемых свидетельствует о повышении венозного давления, компенсируемого ускорением ЛСК [2]. Однако у части обследуемых ЛСК по ПС не изменялась, а у 1 добровольца отмечено замедление кровотока. Учитывая строение синусов твердой мозговой оболочки, их неспособность к растяжению, тенденция к увеличению ЛСК расценивается как благоприятный фактор, предотвращающий повышение давления в венах головного мозга. Напротив, в случае снижения ЛСК по ПС, когда не срабатывают компенсаторные механизмы, замедление ЛСК может привести к повышению венозного внутричерепного давления и соответственно к повышению ликворного давления как компонента единой жидкостной системы головного мозга. Группа авторов при исследовании оттока от головного мозга ультразвуковым методом выявила изменение ЛСК по синусам при пережатии югулярного пути, получая при этом как ускорение, так и замедление ЛСК [10]. Ускорение свидетельствовало о компенсации повышения венозного давления, а замедление – о срыве компенсаторных механизмов и как следствие приводило к повышению венозного и ликворного давления. У обследуемого в иммерсионной ванне в условиях безопорности возможности югулярного пути снижаются, а вертебральный путь, как система с более высоким сопротивлением, в ряде случаев не в состоянии быстро обеспечить отток при повышении объема венозной крови. В этом случае регистрируется уменьшение ЛСК по ПС, что и наблюдали в 1-е сутки у 1 обследуемого. Однако уже на 2-е сутки ЛСК увеличилась и динамика ее по ПС в дальнейшем не отличалась от динамики других обследуемых. Таким образом, можно выделить 2 типа реакции скоростных параметров кровотока по ПС на иммерсионное воздействие – с увеличением ЛСК (1-й тип), и со снижением или отсутствием изменений ЛСК (2-й тип). Необходимо отметить, что в 7-суточной иммерсии было получено замедление ЛСК почти у всех добровольцев на 2-е сутки воздействия с компенсаторным увеличением ее на 5-е сутки у всех обследуемых, т.е. в начале воздействия, уже в 1-е сутки складывались условия, способствующие замедлению венозного оттока. Такую картину

наблюдали на 2-е сутки иммерсии. Но уже начиная с 3-х суток, с максимумом на 5-е сутки, срабатывали компенсаторные механизмы, ЛСК по ПС увеличивалась, и венозный отток восстанавливался. Первый тип реакции свидетельствует о хороших компенсаторных возможностях венозного оттока; 2-й тип, сопровождавшийся снижением ЛСК, мог быть предиктором возникновения нарушения венозного оттока от головного мозга в условиях микрогравитации. В проводимых исследованиях не наблюдали срыва компенсаторных механизмов дренажной системы. У всех добровольцев ЛСК повышалась, у части обследуемых минуя фазу снижения (1-й тип реакции), у других – через снижение ЛСК (2-й тип). Необходимо подчеркнуть важность выявления 2-го типа реакции у людей, подвергающихся действию факторов микрогравитации, так как известно, что существует очень много особенностей строения и вариантов развития венозной системы головного мозга. Так, в нескольких морфологических исследованиях было выявлено отсутствие 1 или 2 синусов, нередко явления латерализации венозного русла и т.п. [10, 11]. При наличии выраженных морфологических изменений венозной системы нельзя исключить декомпенсацию венозного оттока в условиях невесомости [12]. Обследуемым, у которых выявлен 2-й тип реакции, необходимо проводить визуализирующие методы обследования венозной системы, в частности МР-венографию, для прогнозирования динамики венозного оттока и предотвращения значительного повышения венозного и внутричерепного давления.

Добровольцам, у которых не произошло изменений ЛСК по ПС в 3-суточной иммерсии, возможно, не хватило длительности действия факторов безопорности. Для регистрации изменений внутричерепной венозной гемодинамики 5- и 7-суточное воздействие является более информативным.

#### Выводы

1. В условиях иммерсионного воздействия венозный отток от внутричерепных структур осуществляется как по югулярному, так и по вертебральному пути, являясь свидетельством действия факторов микрогравитации.

2. Увеличение ЛСК по венозным синусам твердой мозговой оболочки является механизмом, компенсирующим повышение давления в венозной системе головного мозга.

3. Уменьшение ЛСК в синусах свидетельствует о возможном снижении компенсаторных возможностей венозного оттока из полости черепа, требует динамического наблюдения и служит показанием к проведению дополнительных методов исследования венозной системы головного мозга, включая МР-венографию.

4. Исследование интра- и экстракраниальной венозной гемодинамики является информативным

методом изучения эффектов моделируемой невесомости.

*Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований ГНЦ РФ – ИМБП РАН.*

*Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории гравитационной физиологии сенсомоторной системы за организацию и проведение эксперимента с 3-суточной «сухой» иммерсией.*

#### Список литературы

1. Navasiolava N.M., Custaud M.-A., Tomilovskaya E.S. et al. Long-term dry immersion: review and prospects // Eur. J. Appl. Physiol. 2011. V. 111. P. 1235–1260.
2. Moreva T.I. Research on the peripheral hemodynamics by the method of ultrasonic Doppler examination under the conditions of seven-day immersion // Human Physiol. 2010. V. 36. № 7. P. 239–243.
3. Lichtenstein D., Saifi R., Augarde R. et al. The internal jugular veins are asymmetric. Usefulness of ultrasound before catheterization // Intensive Care Med. 2001. V. 27. P. 301–305.
4. Stolz E., Kaps M., Kern A. et al. Transcranial color-coded duplex sonography of intracranial veins and sinuses in adults // Stroke. 1999. V. 30. P. 1070–1075.
5. Baumgartner R.W., Nirkko A.C., Müri R.M. et al. Transoccipital power-based color-coded duplex sonography of cerebral sinuses and veins // Ibid. 1997. V. 28. P. 1319–1323.
6. Traboulsee A.L., Knox R.B., Machan L. et al. Prevalence of extracranial venous narrowing on catheter venography in people with multiple sclerosis, their siblings, and unrelated healthy controls: a blinded, case-control study // Lancet. 2014. V. 383. P. 138–144.
7. Valdueza J.M., von Münster T., Hoffman O. et al. Postural dependency of the cerebral venous outflow // Ibid. 2000. V. 355. P. 200–201.
8. Schreiber S.J., Lürting F., Götze R. et al. Extrajugular pathways of human cerebral venous blood drainage assessed by duplex ultrasound // J. Appl. Physiol. 2003. V. 94. P. 1802–1805.
9. Ruiz D.S.M., Gailloud P., Rufenacht D.A. et al. The craniocervical venous system in relation to cerebral venous drainage // Am. J. Neuroradiol. 2002. V. 23. P. 1500–1508.
10. Stoquart-ElSankari S., Lehmann P., Villette A. et al. A phase-contrast MRI study of physiologic cerebral venous flow // J. of Cerebral Blood Flow & Metabolism. 2009. V. 29. P. 1208–1215.
11. Zamboni P., Galeotti R., Menegatti E. et al. Chronic cerebrospinal venous insufficiency in patients with multiple sclerosis // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry. 2009. V. 80. P. 392–399.
12. Sugarbaker E.D., Wiley H.M. Intracranial-pressure studies incident to resection of the internal jugular veins // Cancer. 1951. V. 3. P. 242–250.

Поступила 23.10.2017

## **EFFECT OF DRY IMMERSION ON BLOOD FLOW IN JUGULAR VEINS AND CEREBRAL VENOUS SINUS: ULTRASONIC METHODS OF INVESTIGATION**

**Moreva T.I., Kriushev E.S., Moreva O.V.,  
Pasekova O.B.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).  
2018. V. 52. № 2. P. 48–53

*Venous circulation in the brain was investigated in a 3-d dry immersion experiment. The purpose was to study the effect of microgravity factors on venous drainage from the*

*cranial cavity. Duplex scanning and Doppler ultrasound were used to register hemodynamic parameters of the cervical main veins, orbit and cerebral venous sinus. A significant blood flow reduction in the jugular pathway was concurrent with activation of additional pathways in the extra- and intracranial venous systems of the brain. These results suggest trigger of mechanisms capable to compensate the increasing intracranial venous pressure. The fact that in some volunteers the intracranial venous blood flow did not accelerate can reflect anatomical specifics and invite a more scrupulous investigation of their venous systems.*

**Key words:** venous drainage, internal jugular vein, cross-section, tentorial sinus, jugular path, vertebral path, ultrasonic investigation of blood flow.

УДК 579.65+533,5

## ВЫЖИВАНИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ НА ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ ВАКУУМИРОВАНИИ

Дешевая Е.А.<sup>1</sup>, Печеркин В.Я.<sup>2</sup>, Василяк Л.М.<sup>2</sup>, Шубралова Е.В.<sup>3</sup>, Новикова Н.Д.<sup>1</sup>, Гуридов А.А.<sup>1</sup>, Цыганков О.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>3</sup>Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королёв, Московская область

<sup>4</sup>Ракетно-космическая корпорация «Энергия», г. Королёв, Московская область

E-mail: deshevaya@imbpb.ru

*Результаты, полученные ранее в космическом эксперименте (КЭ) «Тест», свидетельствующие об обнаружении на внешней стороне Международной космической станции (МКС) жизнеспособных микроорганизмов, прежде всего спорных форм бактерий и микроскопических грибов, диктуют необходимость более детальной оценки влияния космического пространства на живые системы. В связи с этим при реализации следующего этапа КЭ «Тест» планируется проведение длительного экспонирования микроорганизмов на внешней стороне МКС. В данной работе представлены результаты исследований влияния быстрого вакуумирования на выживание спор бактерий и грибов на поверхности пробоотборника «Тест»-экспонат. На основании полученных данных были отобраны штаммы микроорганизмов наиболее устойчивые к резкому снижению давления для дальнейшего этапа КЭ, а также была определена зависимость выживания спор от состояния поверхности пробника «Тест»-экспонат.*

Ключевые слова: вакуум, Международная космическая станция, бактерии, грибы, выживание микроорганизмов.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 54–59.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-54-59

Известно, что условия высокого вакуума губительны для живых клеток. Основное влияние вакуума на клетки микроорганизмов всегда связано с потерей воды [1, 2]. Действие вакуума на жизнеспособность бактерий быстро уменьшается по мере того, как общее давление падает ниже давления водяного пара, затем скорость отмирания остается постоянной и не зависит от степени разрежения. Повреждение и гибель клеток в вакууме связаны и с увеличенным выходом из клетки связанной и свободной воды, и с нарушением целостности мембраны.

В работах по стерилизации космических аппаратов [1, 2] были проведены эксперименты по изучению микроорганизмов в условиях высокого вакуума. В ходе этих экспериментов изучалась выживаемость

ряда наиболее распространенных видов микроорганизмов при давлениях  $10^{-4}$  –  $10^{-7}$  Па в испытательных вакуумных установках, которые могут безостановочно работать в течение нескольких месяцев. Причем температурный фактор не принимался во внимание и все эксперименты осуществлялись при температурах не выше комнатной.

Результаты свидетельствовали о том, что лишь небольшое количество исследуемых микроорганизмов могло противостоять более или менее продолжительному воздействию вакуума. Некоторые микроорганизмы выживали и после 10-суточного воздействия вакуума с давлением порядка  $10^{-5}$  Па. Однако все микроорганизмы все же погибали после 30-суточного пребывания в вакууме с давлениями  $1,5 \cdot 10^{-6}$  –  $8 \cdot 10^{-7}$  Па.

Позже выяснилось, что наряду с давлением температура также является важнейшим фактором, определяющим жизнеспособность микроорганизмов в глубоком вакууме. Поэтому более эффективными были бы тепловакуумные исследования микроорганизмов [3].

Однако как оказалось, воздействие экстремальных тепловакуумных условий на микроорганизмы имеет свою специфику. Так, анализ результатов различных экспериментов с микроорганизмами и спорами в вакууме показал, что выживаемость (или повреждение) микроорганизмов определяется заданным температурным режимом. При этом значительный диапазон температур, от криогенных до умеренно высоких значений (около 400 К), подразделяется на 3 отчетливые области, специфические по своему воздействию на микроорганизмы и их выживание. Например, при температурах первой из этих областей (от криогенных до комнатных значений) наблюдается практически 100%-ная выживаемость микроорганизмов, при действии температур второй области (от комнатных до несколько повышенных значений) выживаемость всех видов микроорганизмов падает с одинаковой скоростью,



а при высоких температурах в третьей области (от 40 до 180–200 °С) выживаемость микроорганизмов катастрофически падает практически до нуля [4].

В космических экспериментах (КЭ) по изучению влияния факторов космического пространства на выживаемость спор микроорганизмов было показано, что «защищенные» от температуры и космического УФ-излучения организмы (споры бактерий и грибов, а также семена растений) могут выживать в космическом вакууме до 2–3 лет [5].

Согласно данным литературы [6, 7], одновременное воздействие вакуума и УФ-излучения приводит к резкому сокращению количества выживших микроорганизмов. Причем, отмечается, что количество выживших микроорганизмов, облученных УФ-излучением в вакууме, почти в 5 раз меньше количества микроорганизмов, облученных УФ-излучением при атмосферном давлении воздуха [6]. Дополнительное воздействие высокоэнергетическими ионами также приводит к уменьшению выживания микроорганизмов в вакууме [7]. При низких уровнях УФ-излучения механизм инактивации микроорганизмов действует на молекулярном уровне. В этом случае поглощение УФ-фотонов ДНК и РНК может приводить к нарушению в них связей, в частности, тиминовых оснований, результатом чего является неспособность микроорганизмов к воспроизводству [8, 9].

В ходе КЭ «Тест» с разных зон внешней поверхности Международной космической станции (МКС) в доставленных экипажем пробах практически постоянно выявлялись единичные жизнеспособные споры микроорганизмов и фрагменты ДНК [10, 11].

Статистика обнаружения жизнеспособных единиц спорных бактерий с начала эксперимента «Тест» составляет около 46 %. Споры бактерий рода *Bacillus* обнаружены на внешней стороне российского модуля МКС в разные периоды внекорабельной деятельности (ВКД) космонавтов. Во время ВКД-42 были выявлены на экране системы терморегулирования служебного модуля споры гриба рода *Aureobasidium*.

Таким образом, в результате проведения космического эксперимента «Тест» было установлено, что на внешней поверхности МКС периодически обнаруживаются микроорганизмы разных таксонов. Длительность выживания спор микроорганизмов в вакууме и при температурах открытого космоса в настоящее время не определена. Полученные данные о присутствии жизнеспособных единиц спорных бактерий и грибов на внешней стороне МКС позволяют сделать предположение, что спорные формы микроорганизмов могут быть защищены от космического излучения (температуры и ультрафиолета) «космической пылью» или элементами конструкции. В настоящее время временной срок этой «защиты» и длительность выживания разных

споровых форм микроорганизмов в условиях космического пространства, включая космический вакуум, не известны.

До проведения КЭ по экспонированию микроорганизмов на внешней стороне МКС нами были проведены подготовительные исследования, целью которых явился выбор культур бактерий и грибов, способных сохраняться на поверхности пробника в наибольшем количестве при действии быстрого вакуумирования, соответствующего реальным условиям КЭ. Так как на жизнеспособность микроорганизмов на первоначальном этапе экспонирования может влиять состояние поверхности прибора «Тест»-экспонат, то в лаборатории были определены характеристики поверхности прибора, позволяющие снизить действие перепада давления, которое возникнет при разгерметизации прибора «Тест» в условиях космоса перед экспонированием.

### Методика

В серии экспериментов были использованы металлические пластины и стержни пробоотборников, применяемые в КЭ «Тест». Сначала на поверхность пластин и стержней пробоотборников (с ватой и без ваты, на мокрые и сухие) наносили ассоциацию бактерий и грибов. Во 2-й серии экспериментов после нанесения микроорганизмов на поверхность стержней или на вату сверху дополнительно наносили слой углеродных наночастиц марки 286-Ф, имитирующих «космическую пыль». Повторяемость каждой серии экспериментов была трехкратной. Кроме этого, в отдельных исследованиях использовали алюминиевые пластины размером 3 x 3 см и пластины из металла сплава АМг 6, имеющие Т-образную конфигурацию.

Микроорганизмы, наносимые на поверхность пластин и стержней, были выделены с внутренних и внешних поверхностей МКС. Количество их составляло не менее  $10^6$  колониеобразующих единиц на поверхность образца (КОЕ/образец) каждого вида тест-микроорганизмов. В исследованиях использовали только споровые формы следующих видов спорообразующих бактерий и грибов:

бактерии: *Bacillus licheniformis*; *B. subtilis*; *B. pumilus*;

грибы: *Aspergillus sydowi*; *As. niger*; *Penicillium expansum*; *Aureobasidium pullulans*.

После окончания испытаний проводили посев на поверхность плотной питательной среды. Для этого стержни пробоотборника отбалтывали в 100 мл стерильной воды. Посев проводился в асептических условиях (в ламинарном шкафу). С помощью пипетки переносили аликвоты объемом 0,5 мл на поверхность не менее 10 чашек Петри с питательной средой R2A. Затем с использованием стерильного шпателя равномерно распределяли титр

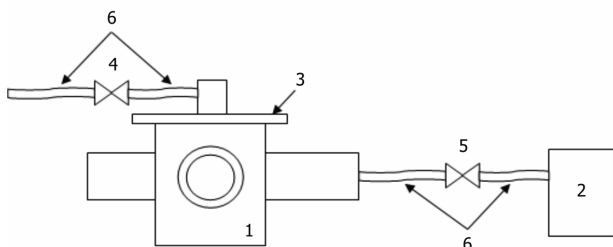


Рисунок. Блок-схема экспериментального стенда.

1 – вакуумная камера; 2 – вакуумный насос; 3 – съемный фланец; 4 – вентиль V2 для наполнения вакуумной камеры воздухом; 5 – вентиль V1 для откачки воздуха из вакуумной камеры; 6 – трубопроводы из вакуумной резины

по поверхности среды и выдерживали некоторое время для абсорбирования влаги агаром. Посевы инкубировали в инвертированном положении при температуре  $30 \pm 1$  °С, т.е. при условиях наиболее благоприятных для роста испытуемых бактерий и грибов.

В данной работе были проведены исследования одной из причин удаления микроорганизмов с тестовых объектов на 1-м этапе экспонирования (время разгерметизации) – резкий перепад давления внутри объекта и вакуум снаружи, при этом потоком воздуха микроорганизмы могут отрываться от поверхности тестового объекта и удаляться в окружающее пространство. Кроме этого, обращали внимание на влажность поверхности при вакуумировании, так как влага быстро испаряется с поверхности тестовых объектов при снижении атмосферного давления, а с ней, возможно, будут удаляться и микроорганизмы.

Для проверки данного предположения в лабораторных условиях был создан экспериментальный стенд, блок-схема которого приведена на рисунке.

Вакуумная камера (1), в которую помещался тестовый объект с микроорганизмами, предназначена для создания воздушного потока при откачке воздуха. Вакуумный насос (2) служит для создания требуемого вакуума. Вентиль (5) обеспечивал включение откачки воздуха и регулировал скорость откачки в вакуумной камере. Вентиль (4) необходим для наполнения вакуумной камеры чистым воздухом, исключая повторное возвращение микроорганизмов обратно в вакуумную камеру, которое возможно через трубопровод откачки из вакуумной резины (6).

Перед началом испытаний внутренняя часть вакуумной камеры и трубопроводов подвергались дезинфекции и сушке. Зараженные микроорганизмами тест-объекты помещали в камеру и проводили герметизацию. После герметизации из вакуумной камеры с помощью вакуумного насоса резко откачивался воздух до давления  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  атм. Каждый

образец выдерживался в вакууме в течение 15 мин. Затем в камеру запускался воздух. Тест-объекты переносили в лабораторию, где в асептических условиях проводили посев и определяли численность сохранившихся культур микроорганизмов на тест-объектах.

В серии экспериментов моделировали возможность сохранения спор микроорганизмов в щелях металлических поверхностей. Для этого использовали ультразвуковой прибор «Крот», который «вбивал» споры микроорганизмов в поверхность металлических пластин.

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные по выживанию микроорганизмов на стержнях в 1-й серии экспериментов.

При вакуумировании тест-объектов были получены следующие результаты:

- наибольшая численность спор бактерий сохранялась на стержне с ватой;
- на чистом металлическом стержне сохранялось меньше бактерий (0,04 %), чем на стержне с ватой (2,9 %);
- напыление слоя углеродных наночастиц марки 286-Ф не способствовало сохранению бактерий, как на чистом металлическом стержне, так и на стержне с ватой;
- грибные споры полностью удалялись с поверхности чистого стержня;
- единичные споры грибов сохранялись на стержне с ватой;
- численность спор грибов, сохранившихся на стержне с ватой и на стержне с ватой + слой углеродных наночастиц марки 286-Ф, была незначительной и колебалась в пределах ошибки исследований.

Таким образом, в 1-й серии экспериментов было установлено, что при вакуумировании могут выживать жизнеспособные бактерии и единичные фрагменты грибов. С наибольшей вероятностью в условиях резкого понижения давления микроорганизмы могут задерживаться в волокнах ваты. Напыление углеродных наночастиц не способствовало сохранению микроорганизмов в условиях вакуума.

В табл. 2 представлены данные по выживанию микроорганизмов на стержнях во 2-й серии экспериментов.

В этой серии экспериментов были получены следующие результаты:

- наибольшая численность грибов и бактерий сохранялась на стержне с ватой: на сухом – 26 и 22,2 %, на влажном – 17 и 10,1 % соответственно;
- на чистом сухом металлическом стержне сохранялось больше грибов (0,53 %), чем на влажном стержне (0). Аналогические результаты получены и для бактерий.

Таблица 1

## Оценка выживаемости спор бактерий и грибов на стержнях отборника

| Ассоциация микроорганизмов (споры)                                       | Характеристика стержня                     | Содержание сохранившихся бактерий, % | Содержание сохранившихся грибов, % |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Бактерии:<br><i>Bacillus licheniformis</i> ,<br><i>Bacillus subtilis</i> | Металлический стержень                     | 0,04 ± 0,008                         | 0                                  |
|                                                                          | Металлический стержень с напылением        | 0,027 ± 0,011                        | 0                                  |
| Грибы:<br><i>Aspergillus niger</i> ,<br><i>Penicillium expansum</i>      | Металлический стержень + вата              | 2,9 ± 0,84                           | 0,017 ± 0,005                      |
|                                                                          | Металлический стержень + вата с напылением | 1,7 ± 0,25                           | 0,018 ± 0,003                      |

Таблица 2

## Оценка выживаемости спор бактерий и грибов на стержнях отборника

| Ассоциация микроорганизмов               | Характеристика стержня                 | Содержание сохранившихся бактерий, % | Содержание сохранившихся грибов, % |
|------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Бактерии:<br><i>Bacillus pumilus</i>     | Металлический стержень сухой           | 0,58 ± 0,17                          | 0,53 ± 0,067                       |
|                                          | Металлический стержень влажный         | 0,1 ± 0,06                           | 0                                  |
| Грибы:<br><i>Aureobasidium pullulans</i> | Металлический стержень + вата, сухие   | 22,2 ± 3,1                           | 26 ± 1,7                           |
|                                          | Металлический стержень + вата, влажные | 10,1 ± 1,54                          | 17 ± 2,17                          |

Таблица 3

## Оценка выживаемости спор бактерий и грибов на металлических пластинах

| Ассоциация микроорганизмов                                                                               | Характеристика пластин | Содержание сохранившихся бактерий, % | Содержание сохранившихся грибов*, % |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Грибы:<br><i>Aspergillus sydowi</i> ,<br><i>Penicillium expansum</i> ,<br><i>Aureobasidium pullulans</i> | Пластина плоская       | -                                    | 0,13 ± 0,016                        |
| Бактерии:<br><i>Bacillus pumilus</i><br>Грибы:<br><i>Aureobasidium pullulans</i>                         | Пластина плоская       | 7,2 ± 1,4                            | 0,13 ± 0,012                        |
| Бактерии:<br><i>Bacillus pumilus</i><br>Грибы:<br><i>Aureobasidium pullulans</i>                         | Пластина<br>Т-образная | 4,5 ± 0,8                            | 0,36 ± 0,21                         |

Примечание.\* – сохранился только гриб *Aureobasidium pullulans*.

Таблица 4

## Оценка выживания бактерий и грибов на металлических пластинах

| Микроорганизмы                           | Содержание сохранившихся микроорганизмов после действия УЗИ, % | Содержание сохранившихся микроорганизмов после воздействия вакуума, % | Содержание сохранившихся микроорганизмов после воздействия УЗИ + вакуум, % |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Бактерии:<br><i>Bacillus pumilus</i>     | 18,7 ± 2,7                                                     | 4,5 ± 0,64                                                            | 16 ± 1,33                                                                  |
| Грибы:<br><i>Aureobasidium pullulans</i> | 1,86 ± 0,046                                                   | 0,36 ± 0,084                                                          | 1,2 ± 0,09                                                                 |

В 3-й серии экспериментов в качестве тест-объекта использовали пластины алюминиевого сплава АМг6, которые аналогичным образом засеивали ассоциацией микроорганизмов, а после вакуумирования определяли число сохранившиеся клеток бактерий и грибов.

В табл. 3 представлены данные о выживании микроорганизмов на металлических пластинах после вакуумирования.

Проведенные исследования с использованием в качестве тест-объектов металлических пластин выявили следующее:

- сохраняемость (выживание) на металлических пластинах спорообразующих бактерий *Bacillus pumilus* почти в 10 раз выше, чем у сохранившегося гриба;

- при вакуумировании грибов выживали только споры микромицета вида *Aureobasidium pullulans*.

С большой вероятностью можно утверждать, что на сохраняемость микроорганизмов при вакуумировании влияла поверхность спор. Так, у бактериальных клеток и у гриба *Aureobasidium pullulans*, имеющего большое количество дрожжеподобных клеток (бластоконидий), поверхность спор влажная, что способствовало лучшей адгезии (прикреплению) к поверхности другого материала, а, следовательно, и большей вероятности сохраниться в этих условиях. Поверхность выбранных тест-культур плесневых грибов сухая, и адгезивные свойства их намного ниже бактериальных спор за один и тот же период времени. При вакуумировании влага удаляется с поверхности материала, а с нею и сухие споры плесневых грибов.

В 4-й серии экспериментов споры микроорганизмов «вбивали» в поверхность металлических пластин с помощью ультразвукового прибора «Крот». В табл. 4 представлены данные о выживании микроорганизмов на металлических пластинах после действия ультразвука и вакуумирования.

Проведенные исследования показали, что выживание микроорганизмов увеличивалось, если перед вакуумированием их «вбивали» в поверхность металлических пластин с помощью ультразвука. Из полученных данных следует, что при попадании микроорганизмов в неровности прибора «Тест»-экспонат вероятность сохранения спор микроорганизмов может увеличиваться почти на порядок.

С большой вероятностью можно утверждать, что на сохраняемость микроорганизмов на поверхности прибора «Тест»-экспонат при разгерметизации (начальный период экспонирования) будет влиять состояние поверхности спор микроорганизмов. Влажная поверхность спор бактерий и гриба *Aureobasidium pullulans* способствует их быстрой адгезии (прикреплению) к поверхности материала, а, следовательно, и большей возможности их сохранения в условиях вакуума. Споры плесневых грибов

имеют сухую поверхность, и их адгезивные свойства намного ниже. Возможно, поэтому, несмотря на их частое обнаружение на внутренних поверхностях МКС в течение 6 лет проведения эксперимента «Тест», они не были обнаружены на внешней стороне МКС.

При резком вакуумировании влага и, вероятно, сухие органические вещества, к которым относятся углеродные наночастицы марки 286-Ф, удалялись с поверхности материала вместе со спорами микроорганизмов.

#### Выводы

1. В условиях краткосрочного вакуумирования в большей степени сохранялись жизнеспособные бактерии и грибы, имеющие влажную поверхность. Возможно, это происходит за счет лучшей адгезии или свойств клеточных мембран этих микроорганизмов.

2. Задерживанию микроорганизмов на поверхности прибора при вакуумировании в большей степени способствовали волокна сухой ваты прибора «Тест»-экспонат.

3. При проведении экспериментов по прямому экспонированию микроорганизмов в открытом космосе следует учитывать, что численность спорообразующих бактерий рода *Bacillus* и гриба *Aureobasidium pullulans* на металлической поверхности может снижаться на 2–4 порядка непосредственно после разгерметизации контейнера (начальный этап экспонирования).

4. На основании полученных данных для проведения КЭ по открытому экспонированию выбраны следующие виды микроорганизмов: *Bacillus pumilus*, *Bacillus subtilis*, *Aureobasidium pullulans*. Состояние поверхности ваты прибора «Тест»-экспонат после нанесения культур микроорганизмов и последующего ультразвукового воздействия должно быть сухим.

Работа проводилась в рамках договора № 4770238802716000051/(16-12-954/(32-1301-2016)-1301/235-2016.

#### Список литературы

1. Мудрецова-Висс К.А. Общая микробиология. М., 1985.  
*Mudretzova-Viss K.A. General microbiology. Moscow, 1985.*
2. Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология. М., 2003.  
*Gusev M.V., Mineev L.A. Microbiology. Moscow, 2003.*
3. Нусинов М.Д. Воздействие и моделирование космического вакуума. М., 1982.



Nusinov M.D. Influence and modeling of cosmic vacuum. Moscow, 1982.

4. Нусинов М.Д. Космический вакуум и надежность космической техники. М., 1986.

Nusinov M.D. Space vacuum and reliability of space technology. Moscow, 1986.

5. Дешева Е.А., Новикова Н.Д., Поликарпов Н.А. и др. Основные итоги космического эксперимента «Биориск» и его перспективы // Космонавтика и ракетостроение. 2007. Т. 49. № 4. С. 64–70.

Deshevaya E.A., Novikova N.D., Polikarpov N.A. et al. The main results of the space experiment «Biorisk» and its prospects // Kosmonavtika i raketostroenie. 2007. V. 49. № 4. P. 64–70.

6. Lindberg C., Horneck G. Thymine photoproduct formation and inactivation of intact spores of *Bacillus subtilis* irradiated with shortwavelength UV (200–300 nm) at atmospheric pressure and in vacuo // Adv. Space Res. 1992. V. 12. № 4. P. 275–279.

7. Horneck G., Biicker H., Reitz G. Long-term survival of bacterial spores in space // Ibid. 1994. V. 14. № 10. P. 41–45.

8. Кармазинов Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Храменков С.В. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. Долгопрудный, 2012.

Karmazinov F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Khramenkov S.V. Ultraviolet technologies in the modern world. Dolgoprudny, 2012.

9. Kowalski W.J. Ultraviolet germicidal irradiation handbook. UVGI for air and surface disinfection. Heidelberg, 2009.

10. Афанасьев А.В., Шубралова Е.В., Цыганков О.С. и др. Исследование космохимии межпланетной пыли в свете представлений гипотезы панспермии // Космонавтика и ракетостроение. 2015. Т. 84. № 5. С. 21–27.

Afanasyev A.V., Shubralova E.V., Tsygankov O.S. et al. Investigation of the cosmochemistry of interplanetary dust in the light of the ideas of the panspermy hypothesis // Kosmonavtika i raketostroenie. 2015. V. 84. № 5. P. 21–27.

11. Цыганков О.С., Гребенникова Т.В., Дешева Е.А. и др. Исследования мелкодисперсной среды на внешней

поверхности Международной космической станции в эксперименте «Тест»: обнаружены жизнеспособные микробиологические объекты // Космическая техника и технология. 2015. № 1. С. 31–42.

Tsygankov O.S., Grebennikova T.V., Deshevaya E.A. et al. Study of the environment finely dispersed on the outer surface of the international space station and detection of microbiological objects in space experiment «Test» // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2015. № 1. P. 31–42.

Поступила 18.05.2017

## SURVIVAL OF MICROORGANISMS ON TEST OBJECTS DURING VACUUMIZATION

**Deshevaya E.A., Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., Shubralova E.V., Novikova N.D., Guridov A.A., Tsygankov O.S.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 54–59

*The presence of viable microorganisms, first and foremost spores of bacteria and microscopic fungi, on external surfaces of the International space station (ISS) evidenced previously in space experiment «Test» calls for a more detail evaluation of space effects on the living systems. In view of this, a long-term external exposure of microorganisms is planned in the next ISS experiment of the «Test» series. The paper reports on survivability of bacterial and fungal spores after fast vacuumization on sampler «Test»-Exponat. These results were used to select microbial strains highly resistant to a sharp pressure drop for the upcoming space experiment, and to understand the dependence of survival on the condition of the sampler surface.*

Key words: vacuum, International space station, bacteria, fungi, survival of microorganisms.

## ВОДОЛАЗНАЯ МЕДИЦИНА

УДК 004:613.6

### ВОДОЛАЗНАЯ АКСИДЕНТОЛОГИЯ КАК АКТУАЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ВОДОЛАЗНОГО ДЕЛА И ВОДОЛАЗНОЙ МЕДИЦИНЫ

Семенцов В.Н.<sup>1, 2, 3</sup>, Иванов И.В.<sup>1, 2, 3</sup>

<sup>1</sup>Государственный научный центр Российской Федерации – Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава Российской Федерации (Сеченовский университет)

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт медицины труда им. академика Н.Ф. Измерова, Москва

E-mail: vadis4@yandex.ru

*Цель исследования – обоснование и систематизация водолазной аксидентологии как актуального направления водолазного дела и водолазной медицины. Дается определение водолазной аксидентологии, показаны основные этапы деятельности эксперта, обращается внимание на важность соблюдения в соответствии с требованиями нормативных актов алгоритма действий при проведении технической, медицинской и комплексной экспертиз при несчастном случае с водолазом. Предлагаемые подходы, разработанная блок-схема действий эксперта и систематизированная информация по основным нормативным актам позволяют повысить эффективность проведения расследования и предупреждения несчастных случаев с водолазами в ходе водолазных работ, профилактики производственно-обусловленных заболеваний и инвалидизации водолазов.*

Ключевые слова: водолаз, водолазная медицина, водолазная аксидентология, катастрофы самолетов над морской акваторией, экспертиза несчастных случаев, нормативные документы, профилактика происшествий.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 60–68.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-60-68

Медицинское расследование летных происшествий занимает важное место среди вопросов обеспечения безопасности полетов авиации с момента ее возникновения и до настоящего времени [1–3]. Правовые основы медицинского расследования авиационных происшествий и инцидентов, основные этапы и содержание работы специалистов медицинской службы при их расследовании достаточно подробно отражены в ряде руководств [3–5].

Часть спасательных мероприятий проводится при авариях и катастрофах самолетов над водой, в том числе над морской акваторией. При этом используется большое количество водолазов, работа которых также требует повышения безопасности и предотвращения несчастных случаев. Однако в отношении

расследования происшествий с участием водолазов обобщенных рекомендаций по их организации и проведению до настоящего времени не разработано, что обуславливает актуальность подобного исследования.

Важно отметить, что в последние годы резко увеличивается использование водных и подводных объектов, технологий и соответственно подводных монтажных работ при геологоразведке, добыче, производстве и транспортировке нефти и газа, спасательных и восстановительных мероприятий при авариях и катастрофах речных, морских судов и самолетов при полетах над водной акваторией, в других видах работ в отдельных отраслях экономики. Усложнение производственных процессов, устаревание технического оборудования, а также снижение уровня ответственного отношения к соблюдению нормативных и правовых актов зачастую ухудшают безопасность жизнедеятельности, приводят к авариям и катастрофам, для ликвидации которых в процессе водолазных работ используется труд водолазов во все возрастающем объеме.

Десятилетия хозяйственной дезинтеграции и послаблений к нарушениям норм права на всех уровнях привели к сокращению либо к распаду крупных организаций по производству подводно-технических работ, которые дорожили своим авторитетом и качеством проведения ремонтно-восстановительных работ под водой, строго соблюдали меры безопасности водолазных спусков, сохранения и повышения квалификации своих водолазов.

Появилось множество мелких фирм, зачастую созданных для выполнения одного подряда, не обладающих достаточными производственными мощностями и квалифицированным персоналом. Нередко стали наблюдаться случаи найма на работу любителей подводного плавания, не представляющих всех сложностей профессиональной деятельности и, что особенно важно, не имеющих правовых оснований ею заниматься [6].

Подобная ситуация не могла не привести к росту количества профессиональных заболеваний и несчастных случаев с водолазами, участились случаи их инвалидизации и смертности не только в России [6–11]. Так, за пятилетний период наблюдений отмечалось в среднем по 36 случаев специфических заболеваний водолазов и по 40 несчастных случаев с водолазами со смертельным исходом в год [6]. Для установления причин происшествий Уголовно-процессуальным и Трудовым кодексами Российской Федерации предусмотрен порядок расследования несчастных случаев на производстве. Использование при этом должностными лицами трудовой инспекции знаний и опыта специалистов в области водолазной медицины будет способствовать объективности результатов расследования и разработке адекватных мероприятий по предупреждению несчастных случаев с водолазами в ходе водолазных работ, профилактики производственно-обусловленных заболеваний и инвалидизации водолазов. Это обосновывает актуальность данного исследования для водолазной службы в России, особенно в плане совершенствования мероприятий по профилактике аварий и несчастных случаев в ходе проведения водолазных спусков.

Цель работы – систематизация мероприятий по экспертным исследованиям в рамках расследования происшествий и несчастных случаев с водолазами как составной части одного из направлений водолазного дела и водолазной медицины – водолазной аксидентологии.

*Водолазная аксидентология как основа  
экспертного исследования несчастных  
случаев с водолазами*

В сложившейся ситуации представляется важным с использованием методов анализа и систематизации более детально обозначить новое направление в водолажном деле, которое способствовало бы выявлению истинных причин происшествий с водолазами, принятию необходимых мер для их ликвидации и недопущению в будущей водолазной деятельности (профилактике).

Общей теоретической основой независимой технической экспертизы при несчастных случаях в любых производственных отраслях является аксидентология. Аксидентология (от англ. accident – авария, несчастный случай) – наука об авариях, их причинах, механизмах, способах и методах предотвращения, а также об оценке последствий аварий и методах их устранения. Можно полагать, что выделение ее частной составляющей – водолазной аксидентологии – включает в себя всестороннее расследование события, связанного с подводной эксплуатацией водолазного снаряжения и оборудования, которое закончилось несчастным случаем, аварией или катастрофой, а также разработку

мероприятий по их предотвращению для повышения надежности профессиональной деятельности водолаза (рис. 1).

Одно из базовых понятий водолазной аксидентологии – безопасность технического средства и вспомогательного оборудования, которые во многом определяют условия возникновения, причины и параметры аварии. Безопасность технического средства и вспомогательного оборудования подразделяется на 2 категории – активная (первичная) безопасность и пассивная (вторичная) безопасность.

Активная безопасность – это комплекс конструктивных, эксплуатационных свойств водолазного снаряжения и оборудования, а также мероприятия по медицинскому обеспечению водолазных спусков, направленные на предотвращение происшествий и исключение предпосылок их возникновения, связанных с качеством здоровья водолаза, а также с конструктивными особенностями водолазного снаряжения и оборудования. В указанный комплекс входят: выполнение требований нормативных правовых актов, наличие медицинского заключения водолазно-медицинской комиссии о годности водолаза, наличие основной и дублирующей систем связи с водолазом, управляемость водолажным снаряжением и оборудованием, электронные системы отслеживания условий погружения для снижения вероятности аварий, информативность, комфортабельность, безотказность водолазного снаряжения и оборудования.

Пассивная безопасность – это способность конструкции оборудования обеспечить защиту человека от травмы и предотвратить смертельный исход при уже возникшей аварийной ситуации.

К характеристикам и средствам пассивной безопасности относятся: водолазный колокол, водолазная беседка и спуско-подъемное устройство, кабель-шланговая связка, ударно-прочностные и демпфирующие свойства водолазных шлемов, газовых баллонов, травмобезопасное стекло лицевой маски или водолазного шлема, оборудование для дыхания водолаза, водолазная рубаша, гидрокостюм и (или) гидрокombineзон, компенсатор плавучести водолаза, манометр с предупреждающим красным сектором на шкале, декомпрессиметр, перчатки, носки, водолазные боты и водолазные галоши, водолазный пояс с грузами, нож, фонарь и т.д.

В понятийной области водолазной аксидентологии важно учитывать и категорию «состояние здоровья» водолазов и обеспечивающего персонала, предполагающую важную роль врачей по водолазной медицине в организации системы медицинского обеспечения надлежащего состояния здоровья водолазов и особенно на этапе допуска к его погружению, а также в процессе расследования аварийных ситуаций с водолазами.

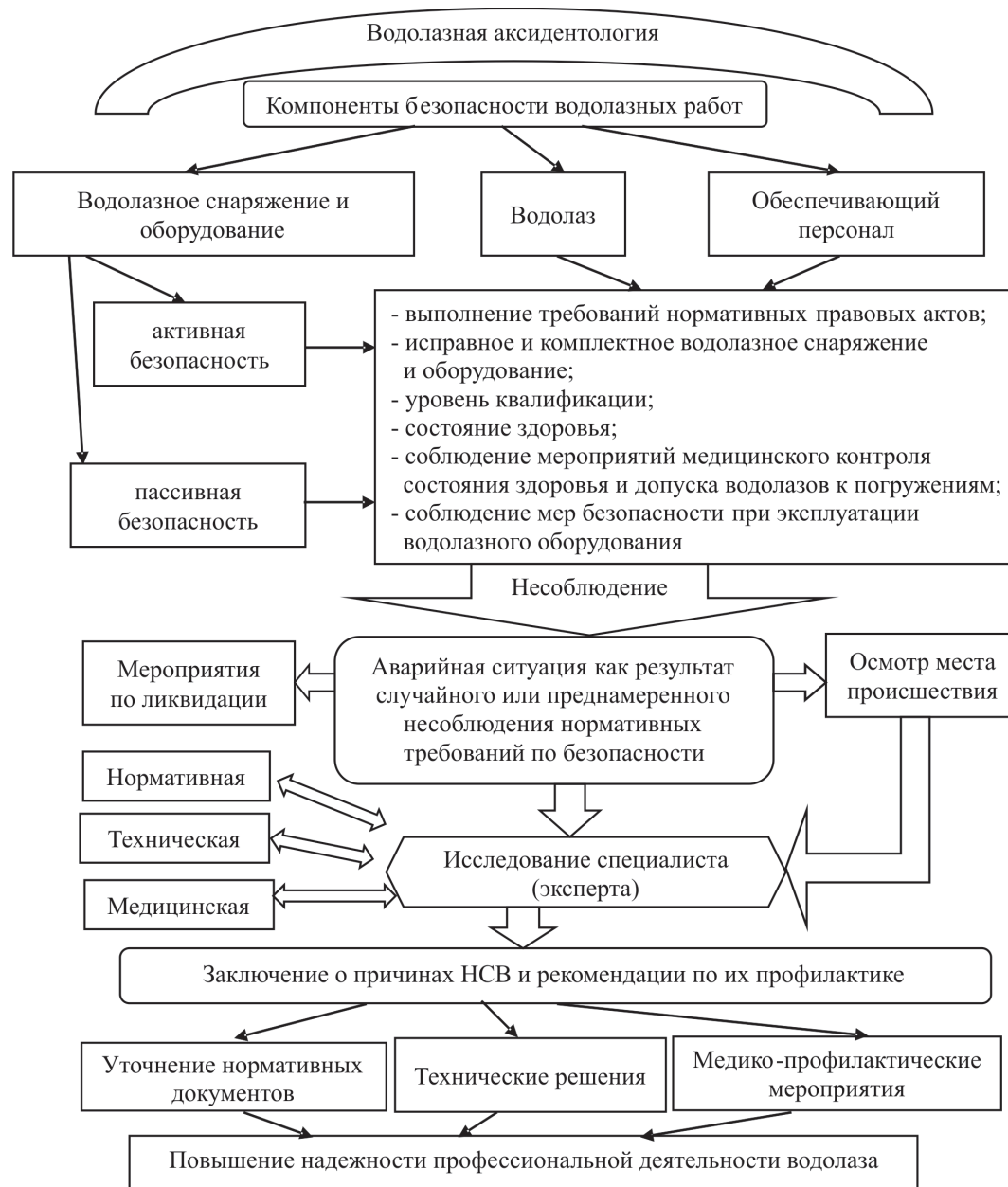


Рис. 1. Блок-схема основных направлений и мероприятий водолазной аксидентологии по безопасности водолазных работ (погружений), обеспечивающих повышение надежности профессиональной деятельности водолаза

#### Расследование несчастных случаев с водолазами

Приведем типичные аварийные ситуации [8]. 1) Водолаза М. опустили под воду в 3-болтовом снаряжении, забыв навернуть гайки соединительных болтов шлема. При сходе в воду водолаз в нарушение правил прыгнул с водолазного трапа и оказался в воде без котелка шлема, что могло привести к несчастному случаю». 2) Водолазный специалист Г. спустился под воду для протаскивания стропа в тоннель под затонувшим судном. Во время работ шкентелем (стальным тросом) перерезало шланг-сигнал водолаза, и он погиб.

В подобных аварийных ситуациях процесс расследований несчастных случаев с водолазами (НСВ) направлен на выяснение взаимосвязи данного случая с внешними условиями, организацией водолазных работ, состоянием водолазной техники и оборудования, состоянием здоровья водолаза, а также обоснование заключения о работоспособности водолазной техники и оборудования, водолазов в конкретных, предполагаемых или известных условиях водолазного спуска.

В этом комплексе мероприятий в виде важной составляющей задействованы и специалисты (эксперты) по водолазной медицине.



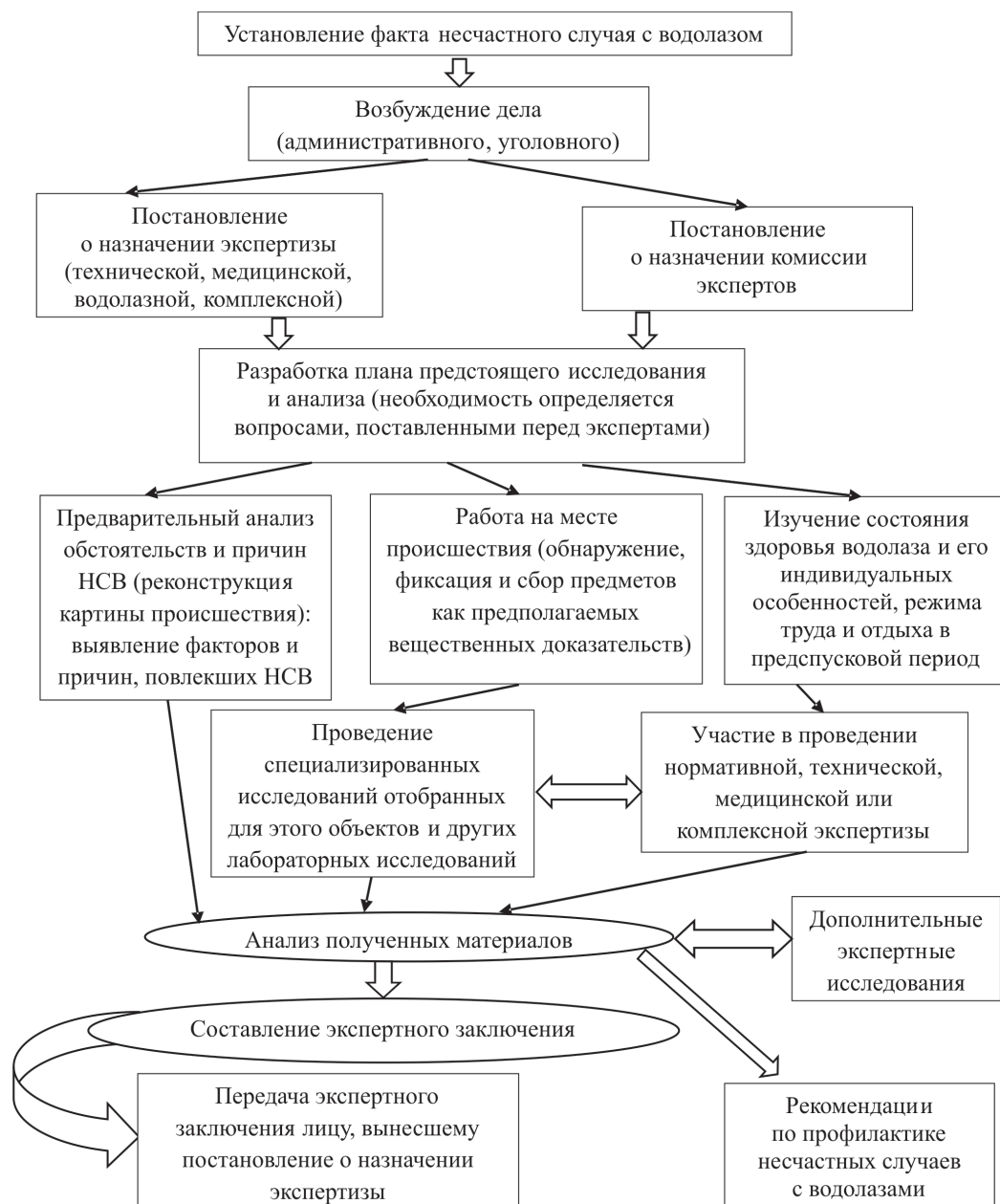


Рис. 2. Основные этапы работы в процессе экспертного исследования при происшествии (несчастном случае) с водолазом

Основные этапы работы в процессе экспертного исследования, согласно нормативным документам, которые систематизированы в таблице, сводятся к следующему (рис. 2):

- установление факта происшествия (несчастного случая) в порядке, определенном Уголовно-процессуальным или Трудовым кодексом;
- возбуждение уголовного (административного) дела;
- постановление о назначении комиссии экспертов;
- постановление о назначении (технической, медицинской или комплексной) экспертизы;

- разработка плана предстоящего анализа происшествия, связанного с водолажными спусками;
- предварительный анализ обстоятельств и причин НСВ (реконструкция картины происшествия): выявление факторов и причин, повлекших НСВ;
- работа на месте происшествия;
- участие в проведении технической и (или) судебно-медицинской экспертизы;
- проведение специализированных исследований отобранных для этого объектов, других лабораторных исследований;
- изучение состояния здоровья и индивидуальных особенностей водолаза;

Таблица

**Нормативные документы, регламентирующие этапы исследования  
происшествия (несчастного случая) при работах с участием водолаза**

| №<br>п/п | Этапы исследования                                                                    | Регламентирующие документы                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Ожидаемые результаты<br>по этапу исследования                                                                                                                             |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | 2                                                                                     | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 4                                                                                                                                                                         |
| 1        | Установление факта происшествия (несчастного случая)                                  | Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 № 197-ФЗ, ст. 227.<br>Постановление Правительства РФ от 15.12.2000 г. № 967 «Об утверждении Положения о расследовании и учете профессиональных заболеваний».<br>Приказ Минздрава России от 28.05.2001 г. № 176 «О совершенствовании системы расследования и учета профессиональных заболеваний в РФ»                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Рапорт об обнаружении признаков происшествия, сопроводительное письмо, сообщение о происшествии, акт о несчастном случае или профессиональном заболевании на производстве |
| 3        | Возбуждение уголовного (административного) дела                                       | Соответствующие статьи УПК (АПК) РФ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Постановление о возбуждении уголовного (административного) дела и принятии его к производству                                                                             |
| 4        | Назначение экспертизы                                                                 | Статьи 195, 196, 199 и 201 УПК РФ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Постановление о назначении (технической, медицинской, комплексной) экспертизы                                                                                             |
| 5        | Назначение комиссии экспертов                                                         | Статьи 38, 57, 195 УПК РФ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Постановление о назначении комиссии экспертов                                                                                                                             |
| 6        | Разработка плана предстоящего анализа происшествия, связанного с водолазными спусками | РД 31.84.01-90. Единые правила безопасности труда на водолазных работах. Часть I. Правила водолазной службы. Часть II. Медицинское обеспечение водолазов.<br>Утверждены Минморфлотом СССР 18.11.1991 г.<br>РД 153-34.0-03.205-2001. Правила безопасности при обслуживании гидротехнических сооружений и гидротехнического оборудования энергоснабжающих организаций. Утверждены приказом Министерства энергетики РФ от 13 апреля 2001 г. № 113.<br>Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 13 апреля 2007 г. № 269 «Об утверждении Межотраслевых правил по охране труда при проведении водолазных работ».<br>Приложение к приказу Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 13 апреля 2007 г. № 269 «Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ» | План предстоящего анализа                                                                                                                                                 |

– изучение режима труда и отдыха в предпусковой период;

– анализ полученных материалов и составление заключения, а также рекомендаций по профилактике НСВ; установление причинной связи между НСВ и несоблюдением требований нормативных, технических и медицинских актов.

Как показано на блок-схеме (рис. 2), в процессе предварительного изучения уточняются известные обстоятельства происшествия, его последствия для водолазов; особенности задач, выполняемых водолазами, где имел случай; составляется план предстоящих действий, подготавливается оснащение, необходимое для работы на месте происшествия.

Работа на месте происшествия направлена прежде всего на изучение первичного состояния и расположения объектов, что нередко оказывается определяющим для всего последующего хода расследования. Ко времени прибытия эксперта (экспертов) на место происшествия поисково-спасательные работы обычно

бывают завершены. Однако возможны случаи, когда мероприятия по спасению и оказанию помощи еще не закончены. В этих условиях участвующие в расследовании эксперты обязаны принять в них участие. В процессе оказания необходимой медицинской помощи на месте происшествия, а также в медицинской организации, где оказывается медицинская помощь, изучаются характер и причины травм пострадавших.

В случае гибели водолаза (водолазов) проводится подробный осмотр и фотографирование останков. При этом отмечаются те элементы конструкций, снаряжения и оборудования, которые могли причинить повреждения. Все указанные выше детали и объекты подлежат дополнительным исследованиям в лабораторных условиях.

Совместно со специалистами инженерной службы эксперт осматривает индивидуальные средства жизнеобеспечения и защиты водолаза. При этом фиксируется фактическое состояние их в данный момент (целостность, комплектность водолазного

Продолжение таблицы

| 1  | 2                                                                                                                                                                                                                   | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 4                                                                                                                                   |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  | Предварительный анализ обстоятельств и причин НСВ (реконструкция картины происшествия): выявление факторов и причин, повлекших НСВ                                                                                  | Положение (методические рекомендации) об экспертных исследованиях при НСВ (проект)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Выявление признаков факторов и причин, повлекших НСВ                                                                                |
| 8  | Работа на месте происшествия                                                                                                                                                                                        | Положение (методические рекомендации) об экспертных исследованиях при НСВ (проект)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Обнаружение, фиксация и сбор предметов – предполагаемых вещественных доказательств                                                  |
| 9  | Проведение исследований отобранных для этого объектов в лабораторных условиях                                                                                                                                       | Постановление о назначении экспертизы.<br>Постановление о назначении комиссии экспертов.<br>Положение (методические рекомендации) об экспертных исследованиях при НСВ (проект)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Предварительные выводы в заключении эксперта (специалиста) о техническом состоянии объектов                                         |
| 10 | Установление причинной связи между НСВ и несоблюдением требований нормативных, технических и медицинских актов                                                                                                      | Положение (методические рекомендации) об экспертных исследованиях при НСВ (проект)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Предварительные выводы в заключении эксперта (специалиста) о наличии причинной связи или ее отсутствии                              |
| 11 | Изучение состояния здоровья и индивидуальных особенностей, изучение режима труда и отдыха водолаза в предпусковой период                                                                                            | Приказ Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 13 апреля 2007 г. № 269 «Об утверждении Межотраслевых правил по охране труда при проведении водолазных работ».<br>Приложение к приказу Министерства здравоохранения и социального развития РФ от 13 апреля 2007 г. № 269 «Межотраслевые правила по охране труда при проведении водолазных работ»                                                                                                                                     | Предварительные выводы в заключении эксперта (специалиста) о наличии причинной связи между состоянием здоровья и НСВ                |
| 12 | Установление причинной связи между НСВ и несоблюдением требований нормативных, технических и медицинских актов; составление экспертного заключения, отвечающего требованиям УПК РФ или иного нормативного документа | Постановление о назначении экспертизы.<br>Положение (методические рекомендации) об экспертных исследованиях при НСВ (проект).<br>Постановление Правительства РФ от 14.10.2000 г. № 789 «Об утверждении правил установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний».<br>Постановление Правительства РФ от 15.12.2000 г. № 967 «Об утверждении Положения о расследовании и учете профессиональных заболеваний» | Окончательные выводы эксперта (специалиста) в экспертном заключении, отвечающем требованиям УПК РФ или иного нормативного документа |
| 13 | Передача экспертного заключения и предложений-рекомендаций по профилактике НСВ                                                                                                                                      | Статьи 38, 57, 195 УПК РФ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Сопроводительное письмо с приложениями:<br>– заключение эксперта (специалиста);<br>– предложения-рекомендации по профилактике НСВ   |

снаряжения, положение вентиля, количество газовой смеси в баллонах и т.д.), а также отмечаются признаки, указывающие на возможные отказы или неправильную эксплуатацию во время водолазного спуска. Кроме того, анализируются действия водолаза при возникновении НСВ. При этом изучаются характер использования средств спасения и защиты, вопросы оказания самопомощи и взаимопомощи, а также эффективность поисково-спасательных работ и первичной медико-санитарной помощи.

*Техническое (водолазно-техническое) и судебно-медицинское экспертное исследование*  
Проводится при неблагоприятных исходах и помимо традиционного для него вопроса о причине смерти и тяжести травм, решает ряд других

задач, выдвигаемых следствием. К их числу обычно относятся:

- что указывает на несоблюдение требований нормативных документов перед и в процессе погружения водолаза;
- имеются ли неисправности водолазного оборудования, снаряжения и другой техники. Если да, то находятся ли они в причинной связи с НСВ;
- какие признаки указывают на рабочую активность водолаза, использование им необходимого снаряжения и оборудования по целевому назначению;
- какие признаки указывают на отравление азотом, кислородом, а также вредными примесями газовой смеси: окисью и (или) двуокисью углерода, углеводородами и др.;

- какие признаки указывают на повреждающий фактор и механизм образования травмы;
- какие симптомы указывают на заболевание или воздействие гипоксии, декомпрессионного заболевания;
- какие признаки указывают на вид утопления (мокрое, асфиктическое, синкопальное), на вид баротравмы (уха, легких и др.), на особенности механического удара и других повреждений, которые могли привести к смерти водолаза;
- какие признаки свидетельствуют об алкогольной и другой интоксикации.

В целях углубленного изучения и дальнейшего осмысления установленных экспертами фактов могут проводиться дополнительные экспертные исследования, в частности, на этапе выяснения механизма повреждающего фактора. Это предполагает получение информации о ряде важных обстоятельств гибели водолаза, его состоянии, характере и последовательности воздействий, правильности эксплуатации водолазного снаряжения, действиях в последний момент аварийной ситуации. Для этого используют экспертные методы: морфологические, токсикологические, биохимические, инженерно-физические, математические, химические и др., – а также различные методы моделирования условий образования обнаруживаемых признаков. Подобное моделирование может проводиться как оперативно, например, воспроизводиться расположением тела водолаза и конструкций объекта, так и в стационарных условиях – в тренировочном бассейне, когда изучается последовательность действий водолаза по мере ухудшения условий водолазного спуска.

Анализ условий и особенностей деятельности водолаза проводится для оценки ситуации, в которой он находился, понимания причин и мотивов его действий, их связи с возникновением и исходом аварийной ситуации. Для проведения такого анализа эксперт должен внимательно изучить наличие и содержание нормативных документов, в частности, документации водолазной станции, наличие и содержание приказов и распоряжений, наряд-задания до момента НСВ и фактическое условие их выполнения (метеоусловия, профиль водолазного спуска, используемое снаряжение и дыхательная смесь, температура воды, время суток, время года и т.д.). Сведения об условиях водолазного спуска можно получить из документации водолазной станции, данных объективного контроля, данных местной метеостанции и т.д. Все собранные данные сопоставляются и анализируются в целях установления физических факторов, которые могли неблагоприятно повлиять на состояние и работоспособность водолаза. Все это имеет большое значение для выяснения причин НСВ и обоснование мер по его предупреждению.

#### *Медицинское экспертное исследование несчастного случая с водолазом*

Вопрос о степени участия врача по водолазной медицине в решении экспертных задач в каждом конкретном случае требует уточнения. Привлекаемый к расследованию врач по водолазной медицине должен оказать помощь в решении вопросов путем оценки роли медико-физиологических компонентов, определяющих условия водолазного спуска: характер воздействовавших факторов, условия водолазного спуска, наличие провоцирующих факторов и т.п.

Изучение медицинской документации, других анамнестических данных имеет своей целью оценку состояния здоровья водолаза и его индивидуальных особенностей. Подробному изучению подлежат личная книжка водолаза, личная медицинская книжка на предмет наличия диагнозов заболеваний, своевременности прохождения водолазно-медицинской комиссии (ВМК) и водолазно-квалификационной комиссии (ВКК). Анализируется история болезни, журнал медицинского обследования водолазов и другие медицинские документы (справки и выписки из медицинских организаций, санаториев, домов отдыха и т.п.).

Обращается внимание на все отклонения в состоянии здоровья, а также на динамику функционального состояния организма по данным медицинских осмотров (в том числе предспусковых, послеспусковых и данных ВМК).

Изучение режима труда и отдыха водолаза проводится с целью выяснения предшествующих НСВ обстоятельств, оказывающих отрицательное влияние на работоспособность водолаза во время водолазного спуска и его готовность к выполнению задания. Выясняются и анализируются сведения о режиме труда, отдыха и питания водолаза, особенно в период подготовки к водолажным спускам и в день происшествия. Сведения о предспусковом периоде собираются путем изучения распорядка дня, опроса руководителей водолазных работ и водолазных спусков, товарищей и других лиц, бывших в непосредственном контакте с водолазом. На основе полученных сведений устанавливается фактический предспусковой режим водолаза с определением времени и условий предспускового отдыха (сна). В результате изучения материалов выявляют особые обстоятельства и факты, которые могли оказать отрицательное влияние на функциональное состояние и работоспособность водолаза.

*Заключительный этап работы эксперта при расследовании НСВ* предполагает анализ и сопоставление всех материалов, полученных в ходе расследования, а также формулирование заключения с выводами по отдельным вопросам, которые ставятся перед экспертом.

Заключение эксперта – это письменный результат исследований и выводов по вопросам,



поставленным перед экспертом. Заключение должно быть понятным и однозначным, все его части должны быть между собой согласованы и не противоречивы. Полученные выводы должны являться результатом логических построений, вытекать из проведенного исследования и формулироваться согласно внутреннему убеждению эксперта [12]. В заключении на основании изучения документации, результатов технической и судебно-медицинской экспертиз, данных дополнительных специальных исследований обобщаются сведения о соблюдении требований нормативных документов, об условиях водолазного спуска, состоянии водолазной техники и оборудования, здоровья водолаза и его работоспособности во время водолазного спуска, закончившегося НСВ. По результатам изучения нормативных документов, работы средств жизнеобеспечения, состояния здоровья, режима труда и отдыха водолаза и специальных исследований указываются все факторы, которые могли способствовать возникновению НСВ. После этого формулируются положения о взаимосвязи НСВ с соблюдением требований нормативных документов, состоянием водолазного оборудования и снаряжения, здоровья и работоспособностью водолаза.

Работа экспертов завершается выработкой рекомендаций по предупреждению повторения подобной аварийной ситуации. Эффективность этих мероприятий во многом определяется тем, насколько объективно и полно удалось выявить конкретные причины данного происшествия, а также все другие недостатки и факторы, способствовавшие их проявлению.

В связи с сохраняющейся аварийностью авиационной техники, в том числе в условиях ее совершенствования [13], разработанные подходы могут при необходимости использоваться и при комплексных расследованиях авиационных происшествий. Единые методологические подходы в исследованиях причин происшествий с летчиками и водолазами обусловлены схожестью этиологии, патогенеза и основных проявлений патологических расстройств и болезней в авиационной и водолазной медицине: декомпрессионных, баротравматических, гипоксических, температурных, вестибулярных и др.

Таким образом, предлагаемое использование общих принципов и подходов аксидентологии и конкретизация их применительно к области водолазной медицины позволит более эффективно анализировать причины аварийных ситуаций с участием водолазов и вырабатывать мероприятия по их предотвращению, предупреждать профессиональные заболевания и повысить надежность профессиональной деятельности водолазов в целом. Вскрывая ряд важных обстоятельств происшествия, выясняя фактические условия, в которых находился водолаз, характер и интенсивность воздействий,

которым он подвергался в аварийной ситуации, медицинские аспекты проблемы, эксперт оказывает помощь расследованию в выяснении причин и обстоятельств аварийного случая в целом. Это требует создания в дальнейшем Положения (Методических рекомендаций) об экспертных исследованиях при несчастных случаях с водолазами. В процессе выработки подобной унифицированной программы по расследованию несчастных случаев с водолазами представляется важным объединение усилий специалистов (экспертов) по водолазному делу, водолазной медицине, авиационной и космической медицине для квалифицированных действий и разработки экспертных заключений, а также для обмена опытом.

### Выводы

1. Даны обоснования и разработаны общие представления о водолазной аксидентологии как актуальном направлении водолазного дела и водолазной медицины.

2. Показана роль привлекаемого к расследованию аварийных ситуаций врача по водолазной медицине в плане оказания помощи в оценке роли медико-физиологических компонентов, определяющих состояние здоровья, уровень работоспособности водолаза и условия водолазного спуска (воздействовавшие факторы, их характер, уровень и временные характеристики, другие параметры водолазного спуска, наличие провоцирующих факторов и т.п.).

3. Предложенные подходы и разработанная блок-схема действий эксперта, систематизированная информация по основным нормативным актам позволяют повысить эффективность проведения расследования и предупреждения несчастных случаев в ходе водолазных работ, профилактики производственно-обусловленных заболеваний и инвалидизации водолазов.

*Работа выполнена в рамках базовой тематики РАН 64.1.*

### Список литературы

1. Благинин А.А., Лизогуб И.Н. Медицинские аспекты безопасности полетов // Воен.-мед. журн. Т. 338. 2017. № 4. С. 51–55.  
*Blaginin A.A., Lizogub I.N. Medical aspects of flight safety // Voenno-meditsinskiy zhurnal. V. 338. 2017. № 4. P. 51–55.*
2. Ушаков И.Б., Рогожников В.А., Поляков М.В. и др. Основы авиационной и космической медицины. М., 2007.  
*Ushakov I.B., Rogozhnikov V.A., Polyakov M.V. et al. The fundamentals of aviation and space medicine. Moscow, 2007.*

3. Руководство по авиационной медицине / Н.А. Разсолов, ред. М., 2006.

Manual of aviation medicine / N.A. Razsolov, ed. Moscow, 2006.

4. Справочник авиационного врача / С.А. Бугров, П.В. Васильев, В.А. Пономаренко, В.Ф. Токарев, ред. М., 1993. Кн. 2. С. 231–300.

Aviation medical directory / S.A. Bugrov, P.V. Vasiliev, V.A. Ponomarenko, V.F. Tokarev, eds. Moscow, 1993. Book 2. P. 231–300.

5. Медицинские аспекты обеспечения безопасности полётов гражданской авиации / А.Н. Бабийчук, ред. М., 1988. С. 270–294.

Medical aspects of ensuring the safety of civil aviation flights / A.N. Babiychuk, ed. Moscow, 1988. P. 270–294.

6. Агапов Я.В. Анализ несчастных случаев и специфической заболеваемости водолазов юга Дальневосточного региона России за период 1995–1999 гг. // Водолазное дело. 2002. № 4–5. С. 16–17.

Agapov Ya.V. The analysis of accidents and specific morbidity of divers of the South Far East region of Russia for the period 1995–1999 // Vodolaznoe delo. 2002. № 4–5. P. 16–17.

7. Згурский В.А. Аварийные происшествия с водолазами в 2001 году // Там же. С. 19–21.

Zgurskiy V.A. Emergency incidents with divers in 2001 // Ibid. P. 19–21.

8. Козлов В.П. Происшествия с водолазами // Там же. С. 7–13.

Kozlov V.P. The incidents with the divers // Ibid. P. 7–13.

8. Смолин В.В., Соколов Г.М., Журавлев В.В., Смирнов А.А. Несчастный случай с акванавтами // Там же. С. 3–4.

Smolin V.V., Sokolov G.M., Zhuravlev V.V., Smirnov A.A. Accident with aquanauts // Ibid. P. 3–4.

10. Bradley M.E. Commercial diving fatalities // Aviat., Space and Environ. Med. 1984. V. 55. № 8. P. 721–724.

11. Smithuis J.W., Gips E., van Rees Vellinga T.P., Gaakeer M.I. Diving accidents: a cohort study from the Netherlands // Int. J. of Emergency Med. 2016. March. P. 9–14.

12. Красовский И. Нежелательные события. Взгляд водолазного эксперта // Нептун. Водолазный проект. 2017 (101). № 2. С. 90–93.

Krasovsky I. The adverse events. Diving expert's opinion // Neptun. Vodolazny projekt. 2017 (101). № 2. P. 90–93.

13. Шишов А.Г. Медицинское изучение и предупреждение летных происшествий // Человеческий фактор: новые подходы в профилактике авиационной аварийности: Матер. юбилейной науч. конф., посв. 90-летию со дня рождения А.Г. Шишова. 2000. С. 88–151.

Shishov A.G. Medical study and prevention of flight accidents // The human factor: new approaches in the prevention of aviation accidents: Proc. of the Anniversary Scientific Conference dedicated to the 90th birthday of A.G. Shishov. 2000. P. 88–151.

Поступила 06.07.2017

## **DIVING ACCIDENTOLOGY AS A MAINSTREAM OF DIVING AND DIVING MEDICINE**

**Sementsov V.N., Ivanov I.V.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia). 2018. V. 52. № 2. P. 60–68

*Goal of the investigation is to provide a substantiation and system of diving accidentology, a topical area in diving work and medicine. Term «diving accidentology» is defined and stepwise expertise following the algorithms of technical, medical and integrated examinations described in respective standard acts. The proposed approaches, examinations flowchart and a checklist improve the quality of diving accident expertise and prevention as of diving accidents, so occupational diseases and disabilities.*

Key words: diver, diving medicine, diving accidentology, aircraft crashes over the sea, accident examination, regulations, accident prevention.

## СПОРТИВНАЯ МЕДИЦИНА

УДК 612.766.1

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЛЫЖНИКОВ-ГОНЩИКОВ С ПОРАЖЕНИЕМ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В МНОГОЛЕТНЕМ ПЕРИОДЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Пастухова И.В.<sup>1, 2</sup>, Сафонов Л.В.<sup>3</sup>, Машковский Е.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центр спортивной медицины ФМБА России, Москва

<sup>2</sup>Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Минздрава Российской Федерации

<sup>3</sup>Федеральный научный центр физической культуры и спорта ВНИИФК, Москва

E-mail: inna\_ugarova@rambler.ru

*В представленном исследовании рассмотрены показатели работоспособности и функциональных возможностей основных систем энергообеспечения паралимпийцев с поражением опорно-двигательного аппарата (ПОДА) – членов сборных команд России по лыжным гонкам и биатлону.*

*Цель исследования: провести анализ закономерностей изменения физической подготовленности спортсменов-паралимпийцев – лыжные гонки спортсменов с ПОДА, в зависимости от периода пред- и постолимпийской подготовки; оценить эффективность восстановительного периода на основании полученных результатов.*

*Физиологические параметры были получены в результате проведения нагрузочных тестов по протоколу ступенчато повышающего теста «до отказа». Лыжники-паралимпийцы, соревнующиеся в категории «сидя» и «стоя», имели сопоставимые с обычными лыжниками тенденции роста показателей работоспособности. Показатели физической работоспособности у спортсменов с поражением верхних конечностей были сопоставимы с показателями практически здоровых спортсменов и имели минимальное количество лимитирующих факторов к развитию физических качеств. Исследование группы лыжников, выступающих в категории «сидя», показало сниженный уровень общей физической подготовленности, что обусловлено наличием более тяжелой инвалидизирующей патологии и соответственно большим количеством факторов, лимитирующих развитие физических качеств. Однако в этой же группе спортсменов был выявлен рост аэробных возможностей в восстановительный период 2014 г. на 11,6 %, что указывает на наличие потенциальных возможностей к развитию характеристик выносливости.*

*Ключевые слова:* паралимпийцы, перетренированность, физическая подготовленность, поражение опорно-двигательного аппарата, циклические виды спорта, работоспособность.

Авиакосмическая и экологическая медицина. 2018. Т. 52. № 2. С. 69–76.

DOI: 10.21687/0233-528X-2018-52-2-69-76

«Потолок» достижений в развитии физических качеств у инвалидов и лиц с ограниченными возможностями по сравнению со здоровыми ограничен и лимитируется характером и тяжестью нарушений двигательной функции, состоянием сохраненных функций, обеспечивающих движение, состоянием центральной и периферической нервной системы и т.п. [1].

Чем глубже тяжесть поражения, тем больше факторов, лимитирующих развитие физических качеств. Процессы компенсации, сниженные функции пораженных систем организма, особенности приспособительных реакций, гиперфункция отдельных мышечных групп влияют на структуру формирования адаптационных механизмов к нагрузкам высокой интенсивности и развитие всех физических качеств (силовых, скоростных, координационных), прежде всего тех, которые преобладают в выбранном виде спорта и определяют конечный результат [1].

В составе паралимпийской сборной команды РФ во многих командах тренируются и принимают участие в соревнованиях, согласно единому календарному плану подготовки, спортсмены с инвалидизирующей патологией различной степени тяжести. Изучение физиологических реакций на нагрузку высокой интенсивности у спортсменов с различной инвалидизирующей патологией имеет большое прикладное значение, позволяющее получить информацию как о функциональных возможностях организма спортсмена при выполнении околопредельных физических нагрузок, так и об индивидуальных границах структурно-функциональных резервов организма, обеспечивающих спортивную деятельность.

Одной из самых титулованных паралимпийских сборных команд РФ является сборная России по лыжным гонкам и биатлону спортсменов с поражением опорно-двигательного аппарата (ПОДА).

Основной состав команды делится почти на равные группы спортсменов с поражением верхних и нижних конечностей, и, согласно гандикапной классификации [2], спортсмены выступают в категории «стоя» (LW 2-5/7) и «сидя» (LW 5/7-12).

Лыжники-гонщики функционального класса LW 2-5/7 имеют повреждения, позволяющие выступать на лыжах без палок или с одной палкой. Лыжники-гонщики функционального класса LW 5/7-12 могут выступать на лыже-санях и выполняют работу только руками. Очевидно, что сравнивать физиологические показатели работоспособности этих двух групп спортсменов невозможно, однако закономерности развития физических качеств спортсменов, тренирующих выносливость, должны быть схожими. Также большой интерес представляет динамика показателей работоспособности в обеих группах спортсменов в зависимости от периода подготовки.

Наблюдение за характером изменения физической работоспособности (ФР) одних и тех же высококвалифицированных спортсменов в один и тот же период подготовки, но с годичным интервалом между тестированиями показало, что в видах спорта, развивающих выносливость, величины, определяющие работоспособность, практически не изменяются, что является основой для текущей оценки и прогноза эффективности тренировочных мероприятий [3–5].

В литературе приводятся многочисленные данные, касающиеся информативности исследования динамики различных показателей, определяющих характер структурно-функциональных изменений различных систем организма спортсмена в процессе тренировки [6–8], однако большинство авторов полагают, что одними из наиболее информативных показателей у спортсменов с преимущественным развитием выносливости, наряду с данными кардиогемодинамики, являются показатели ФР [9–10].

По результатам ступенчато повышающего теста с газоанализом установлено, что в процессе годичного тренировочного цикла ФР у лыжников-гонщиков повышается в среднем на 17 % [4, 7]. Изучение динамики показателей ФР у спортсменов, развивающих выносливость, позволило выявить закономерность: показатели работоспособности высококвалифицированных спортсменов лишь незначительно изменяются в одном и том же периоде подготовки от года к году, в то время как с ростом тренированности в годичном цикле подготовки показатели, обеспечивающие развитие этой характеристики, увеличиваются [7].

Таким образом, индивидуальная оценка динамики показателей работоспособности у спортсменов, деятельность которых требует развития общей выносливости, облегчает определение их физической подготовленности [5, 8]. Исходя из вышеуказанного

и с учетом особенностей периодов обследования спортсменов (осень – ранний предсоревновательный период, весна – конец восстановительного периода или ранний подготовительный), была сформулирована цель проведенного исследования.

Цель исследования: провести анализ закономерностей изменения физической подготовленности спортсменов-паралимпийцев зимних видов спорта – лыжные гонки с ПОДА – в зависимости от периода пред- и постолимпийской подготовки к зимним Олимпийским играм в Сочи (2014 г.); оценить эффективность восстановительного периода на основании полученных результатов.

Задачи исследования: провести отдельный внутригрупповой анализ показателей работоспособности спортсменов, тренирующих выносливость (лыжные гонки и биатлон спортсменов с ПОДА), выступающих в категориях «стоя» и «сидя», с целью выявления зависимости изменений показателей ФР в период пред- и постолимпийской подготовки.

#### Методика

В отделении спортивной медицины паралимпийских видов спорта ФНКЦСМ ФМБА России для оценки функционального состояния спортсменов с ПОДА (по гандикапной классификации LW 5/7-12, вне зависимости от вида спорта) используется ступенчато повышающий тест на ручном эргометре (Schiller, Швейцария) «до отказа», с длительностью ступени 3 мин (для достижения стабилизации регулируемых показателей), мощностью нагрузки для женщин – 20, 40, 60 и более ватт, соответственно каждой ступени, для мужчин – 40, 60, 80 и более ватт, соответственно на каждой ступени, скорость вращения 65–75 оборотов в минуту.

Для спортсменов с ПОДА (по гандикапной классификации LW 2-5/7) для циклических видов спорта применяется ступенчато повышающий тест для выполнения предельной мышечной работы «до отказа» на беговом тредбане HP Cosmos (Saturn) с длительностью ступени 3 мин (для достижения стабилизации регулируемых показателей), мощностью нагрузки для мужчин и женщин – 100 – 150 – 200 – 250 и более ватт, (скорость движения полотна 9,0 – 10,2 – 12,8 – 14,4 и более км/ч) соответственно каждой ступени, угол подъема полотна – 1°.

Показатели газообмена измеряются на протяжении всего теста газоанализатором Oxycon Pro (Erich Jaeger GmbH, Германия) и заканчиваются после отказа спортсмена от выполнения работы. ЭКГ регистрируется при помощи диагностической рабочей станции CARDIOVIT CS-200 (Schiller, Швейцария) на протяжении всего теста и в течение 10 мин после окончания работы с целью определения текущего состояния сердечно-сосудистой системы и функциональных изменений в сердечной



мышце в условиях максимальной мышечной нагрузки и периода восстановления. Анаэробный порог (АнП) определяется по динамике легочной вентиляции и соотношению вентиляционных эквивалентов. Кроме того, рассчитываются показатели, характеризующие эффективность деятельности окислительной энергетической системы (мощность анаэробного порога и способность организма к усвоению кислорода).

Оценку ФР и функциональных возможностей основных систем энергообеспечения паралимпийцев осуществляли на основе анализа показателей: Тр – время работы в тесте, мин; НАнП – мощность анаэробного порога, Вт; ПК АнП – потребление кислорода на уровне анаэробного порога, мл/мин/кг; МПК/кг – максимальное потребление кислорода, приведенное к единице массы спортсмена, мл/мин/кг; Nmax – предельная мощность, достигнутая в тесте, Вт (показатель мощности максимальной аэробной производительности); % АнП от МПК – процентное соотношение потребления кислорода на уровне анаэробного порога от максимального потребления кислорода теста.

Показатели значений работоспособности были взяты за двухгодичный период наблюдений – с 2012 по 2014 г. Годичный цикл наблюдений включал в себя 2 периода исследований, соответствующих 2 разным периодам подготовки: раннему предсоревновательному периоду, в данном исследовании он имел условное обозначение «осень» с указанием года исследования (осень 2013 г.), и концу восстановительного периода или началу раннего подготовительного периода – в нашем исследовании имел условное обозначение «весна», с указанием года исследования (весна 2013 г.).

У паралимпийцев, как и у обычных спортсменов, с более низкой квалификацией можно ожидать значительные сдвиги в показателях работоспособности (как в сторону роста, так и в сторону снижения) на разных этапах подготовки, что может быть следствием адаптации к нагрузкам высокой интенсивности и/или снижением уровня общей физической подготовленности.

Для решения поставленной задачи был проведен анализ работоспособности спортсменов лыжных гонок и биатлона, выступающих в категории «стоя» и «сидя».

Так как распределение данных не подчинялось нормальному распределению ( $p > 0,2$ , тест Колмогорова – Смирнова), то использовались методы непараметрической статистики: 1) для описания данных использовались такие параметры, как медиана, минимальное и максимальное значения, 25 и 75 % процентиля; 2) для оценки 2 повторных внутригрупповых различий использовался парный тест Уилкоксона. Различия считали статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

В исследовании показателей работоспособности спортсменов сборной России по лыжным гонкам и биатлону с ПОДА, выступающих по гандикапной классификации в категории «стоя» или LW 2-5/7, принимали участие 12 (100 %) человек, из них 2 (16,7 %) женщины, 10 (83,3 %) мужчин. В функциональном классе «сидя» или LW 5/7-12 было обследовано 13 спортсменов, из них 2 женщины (15,3 %) и 11 (84,6 %) мужчин. В связи с малочисленностью группы женщин данные их работоспособности включили в общий анализ всей команды.

Возраст обследованных спортсменов, выступающих в категории «стоя», колебался в диапазоне от 17 до 42 лет, продолжительность занятий лыжными гонками – от 10 до 15 лет, квалификация спортсменов – 9 (75 %) заслуженных мастеров спорта (ЗМС) и 3 (25 %) спортсменов – мастера спорта международного класса (МСМК). Возраст обследованных спортсменов, выступающих в категории «сидя», колебался от 18 до 32 лет, продолжительность занятий лыжными гонками – от 3 до 7 лет. Квалификация спортсменов: 3 (23,07 %) – кандидаты в мастера спорта, 2 (15,3 %) – мастера спорта, 8 (61,5 %) – заслуженные мастера спорта.

Перед обследованием всеми спортсменами подписывалось Информированное согласие на обработку персональных данных.

### *Результаты и обсуждение*

Малочисленность исследуемых групп лыжников затрудняла проведение статистического анализа, поэтому в данной работе рассматривались медианные значения, так как даже незначительные изменения их в любую сторону указывали на наличие тенденции либо к росту, либо к снижению показателей в целом.

В табл. 1 представлены медианные значения показателей работоспособности спортсменов-лыжников, выступающих в категории «стоя» (LW 2-5/7).

Как видно из представленных данных, статистически значимых различий в показателях работоспособности спортсменов-лыжников, выступающих в категории «стоя», за весь период наблюдений не было выявлено. Однако при анализе абсолютных значений отмечено, что наибольшие сдвиги в этой группе спортсменов наблюдались в значениях потребления кислорода на уровне АнП в процентах от МПК, и в восстановительный период 2013 и 2014 гг. Необходимо отметить, что высокие значения % АнП от МПК в восстановительном периоде позволяют наращивать тренировочные нагрузки без ущерба для здоровья и общего уровня физической подготовленности спортсмена и все спортсмены из исследуемой группы в подготовительном и раннем соревновательном периоде обладали значительным потенциалом к развитию специальных возможностей.

Таблица 1

**Показатели медианных значений работоспособности лыжников-гонщиков, выступающих в категории «стоя», в пред- и постолимпийский период подготовки 2012–2014 гг.**

| Наименование параметров                          | Лыжники<br>«стоя».<br>Осень, 2012 | Лыжники<br>«стоя».<br>Весна, 2013 | Лыжники<br>«стоя».<br>Осень, 2013 | Лыжники<br>«стоя».<br>Весна, 2014 |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Общая продолжительность выполнения теста (мин:с) | 9:09                              | 8:67                              | 9:43                              | 8:37                              |
| ПК АНП (мл/мин/кг)                               | 54,4                              | 52,9                              | 52,8                              | 52,7                              |
| МПК (мл/мин/кг)                                  | 63,35                             | 59,3                              | 62,5                              | 61,5                              |
| Предельная мощность (Вт)                         | 226                               | 232                               | 258                               | 236,5                             |
| % ПК от АНП                                      | 86,3                              | 93,42                             | 85,3                              | 91,03                             |

Таблица 2

**Показатели медианных значений работоспособности лыжников-гонщиков, выступающих в категории «сидя», в пред- и постолимпийский период подготовки 2012–2014 гг.**

| Наименование параметров                          | Лыжники<br>«сидя».<br>Осень, 2012 | Лыжники<br>«сидя».<br>Весна, 2013 | Лыжники<br>«сидя».<br>Осень, 2013 | Лыжники<br>«сидя».<br>Весна, 2014 |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Общая продолжительность выполнения теста (мин:с) | 6,46                              | 7,61                              | 9,14                              | 6,87                              |
| ПК АНП (мл/мин/кг)                               | 32,4                              | 18,9                              | 21,1                              | 21,3                              |
| МПК (мл/мин/кг)                                  | 35,4                              | 35,7                              | 42,8                              | 35,7                              |
| Предельная мощность (Вт)                         | 120                               | 100                               | 120                               | 100                               |
| % ПК от АНП                                      | 83,9                              | 50,67                             | 61,82                             | 60,5                              |

Тем не менее при анализе % АНП от МПК выявили снижение этого показателя в восстановительном периоде 2014 г. в сравнении с аналогичным периодом 2013 г. Снижение этого показателя в восстановительный период является негативным фактором и указывает на недостаточное восстановление спортсменов в специально отведенный для этого период подготовки. Анализ причин такого явления становится важным.

Поскольку величина % АНП от МПК складывается из 2 ранее исследованных величин, МПК и ПК на уровне АНП, то необходимо оценить, за счет какого показателя снизилось процентное соотношение. Как ранее было выявлено при оценке абсолютных медианных значений, показатели ПК АНП в восстановительном периоде 2014 г. не претерпели значительных изменений как в сравнении с аналогичным периодом 2013 г., так и в сравнении с показателями раннего предсоревновательного, предолимпийского периода подготовки. В то же время значения МПК в восстановительном периоде 2014 г. увеличились на 3,5 % в сравнении с аналогичным периодом 2013 г. и незначительно, всего на 1,6 %, снизились по сравнению с ранним предсоревновательным предолимпийским периодом. Таким образом, очевидно, что снижение основного показателя потенциальных возможностей исследуемой группы паралимпийцев произошло за счет повышения уровня МПК – основного

показателя общей работоспособности, что отрицательно сказалось на динамике значений, демонстрирующих аэробную производительность исследуемой группы спортсменов. Полученные результаты, скорее всего, являются следствием неэффективного восстановления сразу после Паралимпиады 2014 г. и связано со значительной растренированностью в исследуемый период.

Второй группой спортсменов, которая принимала участие в исследовании, были паралимпийцы, тренирующиеся в лыжных гонках и биатлоне, выступающие в категории «сидя», или по гандикапной классификации LW 5/7-12.

Это наименее изученная группа паралимпийцев. В литературе присутствуют лишь единичные работы, посвященные анализу показателей специальной работоспособности спортсменов, выполняющих нагрузку только руками.

По понятным причинам сравнивать значения показателей работоспособности спортсменов, выступающих «стоя» и «сидя», невозможно, однако выявить соответствия и закономерности роста или снижения основных показателей работоспособности в зависимости от периода подготовки вполне оправданно, так как подготовка и тех и других спортсменов проходит в соответствии с единым календарным планом годового цикла подготовки.

Поскольку лыжники, выступающие в категории «сидя», также развивают характеристики выносливости, то основными показателями работоспособности для них будут те же значения, что и для лыжников, выступающих в категории «стоя»: продолжительность выполнения теста Тр (мин), ПК АНП (мл/мин/кг), МПК (мл/мин/кг), Nmax (Вт), % ПК АНП от МПК.

В табл. 2 представлены медианные значения показателей работоспособности лыжников-гонщиков, выступающих в категории «сидя» (LW 5/7-12).

Полученные результаты исследования данной группы спортсменов свидетельствовали об увеличении продолжительности выполнения теста в ранний предсоревновательный, предолимпийский период подготовки на 41 % (Осень, 2012 – Осень, 2013 на 41 % ( $p = 0,016$ ); Весна, 2013 – Весна, 2014: статистически значимые различия отсутствовали ( $p = 0,27$ ). При сравнении результатов исследования в восстановительном периоде 2013–2014 гг. статистически достоверных различий выявлено не было, однако при анализе абсолютных медианных значений выявили снижение исследуемого показателя в сравнении с аналогичным периодом 2013 г. на 9,7 %. То есть на первый взгляд показатели продолжительности выполнения теста в восстановительный период после Паралимпиады 2014 г. снизились на 9,7 % в сравнении с аналогичным периодом 2013 г. и на 24,8 % в сравнении с показателями предшествующего периода подготовки 2014 г. Полученные результаты свидетельствуют о том, что лыжники, выступающие в категории «сидя», подвержены той же тенденции к растренированности, что и спортсмены в категории «стоя».

Потребление кислорода в момент наступления анаэробного порога у лыжников, выступающих в категории «сидя», также имели статистически достоверные сдвиги (Осень, 2012 – Осень, 2013 – статистически достоверное снижение на 35 % ( $p = 0,041$ ), Весна, 2013 – Весна, 2014 – статистически достоверных различий нет ( $p = 0,33$ ). Полученные результаты свидетельствуют об очевидной отрицательной тенденции в динамике значений потребления кислорода при наступлении анаэробного порога, полученное статистически достоверное различие на 35 % в раннем предсоревновательном (предолимпийском) периоде подготовки является существенным и на первый взгляд отрицательным прогностическим признаком. ПК АНП – один из наиболее чувствительных показателей работоспособности, изменения которого происходят в ответ на нагрузку высокой интенсивности скоростно-силовой направленности. Так же как и у спортсменов, выступающих в категории «стоя», в указанный период подготовки стояли тренировочные задачи по совершенствованию скоростно-силовых качеств. Поэтому данное снижение мы рассматривали как ответ на тренировочную нагрузку, соответствующую периоду подготовки. Более значимым являлось

повышение данного показателя в ранний предсоревновательный, предолимпийский период 2014 г., когда значения ПК АНП увеличились на 10,4 %, и, что особенно важно, сохранение этих значений и восстановительном периоде 2014 г. Описанная тенденция демонстрирует формирование кумулятивного тренировочного эффекта, который позволяет сохранить основополагающие показатели работоспособности вне зависимости от снижения уровня физических нагрузок. При сравнении динамики изменения ПК АНП у лыжников, выступающих в категории «сидя» и «стоя», был выявлен однонаправленный характер изменений, но со значительными колебаниями в сторону роста и снижения, что указывает на сниженный уровень общей физической подготовленности спортсменов исследуемой группы.

Сравнение показателей МПК у спортсменов, выступающих в категории «сидя», показало статистически достоверное увеличение на 11 % ( $p = 0,021$ ) в периоды Осень, 2012 – Осень, 2013, в периоды Весна, 2013 – Весна, 2014 статистически значимых различий не было выявлено ( $p = 0,28$ ). Результаты, представленные в табл. 2, продемонстрировали статистически достоверное увеличение МПК на 11 % в раннем предсоревновательном (предолимпийском) периоде, однако на остальных этапах подготовки значения МПК находились практически на одном уровне, что может свидетельствовать о неполной реализации потенциала спортсменов-колясочников, а также недостаточном росте уровня общей физической подготовленности. Сравнение сдвигов показателя МПК лыжников-гонщиков, выступающих в категории «стоя» в аналогичный период наблюдения, показало, что в первой исследуемой группе наблюдался незначительный рост этого показателя, а в группе лыжников-гонщиков, выступающих в категории «сидя», динамика значений МПК отсутствовала. Данное наблюдение соотносится с данными литературы и соответствует общепринятой для практически здоровых спортсменов оценкой показателей работоспособности по показателям МПК. Таким образом, незначительный рост значений МПК у лыжников-гонщиков, выступающих в категории «стоя», в восстановительный период 2014 г. указывает на достаточно высокий уровень квалификации этих спортсменов. У лыжников-гонщиков, выступающих в категории «сидя», рост МПК в восстановительный период от года к году не наблюдался. Резкое увеличение МПК в подготовительный период 2014 г. и его резкое снижение в восстановительный период могли быть связаны с более низкой квалификацией спортсменов и с неэффективным восстановлением соответственно [11].

Результат сравнения показателей предельной мощности, достигнутой в тесте лыжниками, выступающими в категории «сидя», показал статистически достоверное увеличение на 27 % ( $p = 0,008$ ) в

Таблица 3

**Сравнительный анализ показателей работоспособности паралимпийцев в зависимости от периода годового цикла подготовки за период 2013–2014 гг.**

| Показатели работоспособности | Сборная России по лыжным гонкам и биатлону с ПОДА, функциональный класс «стоя», или LW 2-5/7 (%) |                                | Сборная России по лыжным гонкам и биатлону с ПОДА, функциональный класс «сидя», или LW 5/7-12 (%) |                                |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                              | Ранний предолимпийский период подготовки (осень, 2013)                                           | Период восстановления, 2014 г. | Ранний предолимпийский период подготовки (осень, 2013)                                            | Период восстановления, 2014 г. |
| Тр                           | ↑3,6                                                                                             | ↓11,2                          | ↑41                                                                                               | ↓9,7                           |
| НАнП                         | ↓1,2                                                                                             | ↓5,2                           | ↓27                                                                                               | ↑66,6                          |
| ПК АнП (мл/мин/кг)           | ↓2,9                                                                                             | ↔ различий не выявлено         | ↓35                                                                                               | ↑11,2                          |
| МПК                          | ↔ различий не выявлено                                                                           | ↑3,57                          | ↑11                                                                                               | ↔ различий не выявлено         |
| Nmax                         | ↑14                                                                                              | ↑2                             | ↑27                                                                                               | ↔ различий не выявлено         |
| % ПК АнП от МПК              | ↓1,15                                                                                            | ↓2,5                           | ↓26,3                                                                                             | ↑16                            |

ранний предсоревновательный период Осень, 2012 – Осень, 2013 г. В восстановительный период Весна, 2013 – Весна, 2014 статистически значимых различий выявлено не было ( $p = 0,09$ ). Для сравнения в группе спортсменов, выступающих в категории «стоя», этот показатель был единственным, достоверно увеличившимся на 14 % в раннем предсоревновательном периоде 2013 г. В восстановительном периоде 2014 г. в обеих группах спортсменов, выступающих в категориях «стоя» и «сидя», наблюдалось снижение этого показателя, но не ниже значений аналогичного предыдущего периода 2013 г. Полученные результаты свидетельствуют о схожих тенденциях в изменении показателей максимальной мощности у спортсменов, выступающих в категории «стоя» и «сидя». Однако в группе спортсменов, выступающих в категории «сидя», эти изменения имели гораздо более выраженный характер, что указывает на более низкий уровень их общей физической подготовленности.

Относительное потребление кислорода на уровне анаэробного порога (% ПК АнП от МПК) у спортсменов, выступающих в категории «сидя», претерпевало статистически значимое снижение ( $p = 0,004$ ) на 26,3 % в предсоревновательный период 2013 г. (Осень, 2012 – Осень, 2013). В восстановительный период (Весна, 2013 – Весна, 2014) статистически значимых различий не было выявлено ( $p = 0,059$ ). Необходимо отметить, что такие изменения вызваны не объективными недостатками в подготовке спортсменов, а в технических особенностях проведения теста. Некоторые спортсмены-колясочники в 2012 г. не однозначно понимали принцип работы при ступенчато повышающем тесте «до отказа» и, возможно, выполняли работу не в полную силу, вследствие чего показатели МПК не соответствовали

реальному уровню подготовки спортсмена. Тем не менее снижение этого показателя в восстановительный период 2013 г. свидетельствовало о выраженной растренированности. При этом рост % ПК АнП от МПК на 18 % к предсоревновательному периоду 2013 г. свидетельствует о значительном росте аэробной производительности. Более того, эти значения снизились к восстановительному периоду 2014 г. на 2 %, но остались выше значений аналогичного периода подготовки 2013 г. на 16 %.

Обобщенные результаты исследования обеих групп спортсменов представлены в табл. 3, где приведены процентные значения, описывающие изменения показателей в сравнении с предыдущим аналогичным периодом подготовки.

Наиболее значимые изменения показателей работоспособности, причем как в сторону роста, так и снижения, наблюдались во 2-й обследуемой группе – группе спортсменов с ПОДА, функциональный класс «сидя» (см. табл. 3). Выявленные на различных этапах годового цикла подготовки изменения показателей работоспособности лыжников, выступающих в категории «сидя», по характеру своих изменений коррелировали с результатами, полученными у спортсменов, выступающих в категории «стоя», однако по своей выраженности были значительнее, что объясняется более низким уровнем общей физической подготовленности спортсменов, более низкой квалификацией и большим количеством лимитирующих факторов, влияющих на развитие физических качеств.

#### Выводы

1. Лыжники-паралимпийцы, соревнующиеся в категории «сидя» и «стоя», имеют сопоставимые с обычными лыжниками тенденции роста показателей



работоспособности, что подтверждается увеличением максимальных мощностных характеристик паралимпийцев в среднем на 14 % в 1-й и 27 % во 2-й обследуемых группах в предолимпийском периоде подготовки 2013 г.

2. Показатели физической работоспособности у спортсменов с поражением верхних конечностей сопоставимы с показателями практически здоровых спортсменов.

3. Исследование группы лыжников, выступающих в категории «сидя», показало низкий уровень общей физической подготовленности, что обусловлено наличием более тяжелой инвалидизирующей патологии, лимитирующей развитие физических качеств. Однако в этой же группе спортсменов был выявлен рост аэробных возможностей в восстановительный период 2014 г. на 11,6 %, что указывает на наличие потенциальных возможностей к развитию характеристик выносливости.

4. В обеих обследуемых группах наблюдались сдвиги в сторону растренированности в восстановительный период подготовки, что связано с организационными особенностями построения единого календарного плана годичного цикла подготовки, и это негативно сказывалось на спортивной форме атлетов. При этом снижение физических кондиций у спортсменов, выступающих в категории «сидя», происходило быстрее, а по показателям работоспособности – значительнее.

5. Проведенный анализ медианных значений показателей работоспособности паралимпийцев, соревнующиеся в категории «сидя» и «стоя», показал имеющийся у них рост показателей от года к году, что дает основание ожидать повышения показателей работоспособности на последующих этапах в многолетней подготовке спортсменов.

#### Список литературы

1. Теория и организация адаптивной физической культуры: Учебник: В 2 т. Т. 1. Введение в специальность. История и общая характеристика адаптивной физической культуры / С.П. Евсеев, ред. М., 2003.

Theory and organization of adaptive physical culture: Textbook: In 2 vol. V. 1. Introduction to specialty. History and general characteristic of adaptive physical culture / S.P. Evseev, ed. Moscow, 2003.

2. Евсеев С.П. Подходы к определению процентов гандикапа в адаптивном спорте // Адаптивная физическая культура. 2008. №2 (34). С. 33–36.

Evseev S.P. Approaches to determination of percent of a handicap in adaptive sport // Adaptivnaya fizicheskaya kul'tura. 2008. №2 (34). P. 33–36.

3. Солодков А.С. Физическая работоспособность спортсменов и общие принципы ее коррекции (Ч. 2) // Ученые записки Университета им. П.Ф. Лесгафта. 2014. № 4 (110). С. 151–158.

Solodkov A.S. Physical capacity of athletes and general principles its corrections (Part 2) // Uchenye zapiski Universiteta imeni P.F. Lesgafta. 2014. № 4 (110). P. 151–158.

4. Карпман В.Л., Белоцерковский З.Б., Гудков И.А. и др. Исследование физической работоспособности у спортсменов // Кардиогемодинамика и физическая работоспособность у спортсменов. М., 2012. С. 48–49.

Karpman V.L., Belotserkovskiy Z.B., Gudkov I.A. et al. Research of physical working capacity in athletes // Cardiohemodynamics and physical performance in athletes. Moscow, 2012. P. 48–49.

5. Ландырь А.П., Добровольский О.Б., Султанова О.А. и др. Анализ значений частоты сердечных сокращений у спортсменов при тренировочной нагрузке в микроцикле (лекция) // Спортивная медицина: наука и практика. 2015. № 1. С. 31–35.

Landyr' A.P., Dobrovol'skiy O.B., Sultanova O.A. et al. The analysis of heart rate in athletes at a training in a microcycle (lecture) // Sportivnaya meditsina: nauka i praktika. 2015. № 1. P. 31–35.

6. Фудин Н.А., Классина С.Я. Системный анализ спортивной деятельности человека на беговой дорожке при возрастающих по интенсивности физических нагрузках // Там же. 2016. Т. 6. № 1 (22). С. 5–9.

Fudin N.A., Klassina S.Ya. The systemic analysis of sports activity of the person on the treadmill at the exercise stresses increasing on intensity // Ibid. 2016. V. 6. № 1 (22). P. 5–9.

7. Жукова Л.Н., Левичева В.И., Марков Л.Н. и др. Динамические изменения показателей физической работоспособности у лыжников-гонщиков в годичном тренировочном цикле // Вопросы спортивной кардиологии. М., 1972. С. 52–54.

Zhukova L.N., Levicheva V.I., Markov L.N. et al. Dynamic changes of indicators of physical working capacity at skiers-racers in a year training cycle // Aspects of sports cardiology. Moscow, 1972. P. 52–54.

8. Ландырь А.П., Ачкасов Е.Е., Медведев И.Б. Тесты с дозируемой физической нагрузкой в практике спортивной медицины. М., 2014.

Landyr' A.P., Achkasov E.E., Medvedev I.B. Tests with the dosed exercise load in practice of sports medicine. Moscow, 2014.

9. Разинкин С.М., Самойлов А.С., Фомкин П.А. и др. Методологический подход к оценке функциональных резервов спортсменов циклических видов спорта // Спортивная медицина: наука и практика. 2016. Т. 6. № 1. С. 26–35.

Razinkin S.M., Samoylov A.S., Fomkin P.A. et al. Methodological approach to assessment of functional reserves of athletes of cyclic sports // Sportivnaya meditsina: nauka i praktika. 2016. V. 6. № 1. P. 26–35.

10. Пастухова И.В., Сафонов Л.В. Использование индивидуальных тренировочных пульсовых зон для предупреждения развития перетренированности у слэдж-хоккеистов // Там же. 2015. Т. 5. № 4. С. 96–103.

Pastukhova I.V., Safonov L.V. Using of individual training pulse zones for prevention of development of overtraining in sledge-hockey players // Ibid. 2015. V. 5. № 4. P. 96–103.

11. Janssen T.W.J., van Oers C.A.J.M., Hollander A.P. et al. Isometric strength, sprint power and aerobic power in individuals with spinal cord injury // Med. Sci. Sports Exerc. 1993;25:863–870.

Поступила 12.10.2017

**COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS  
OF CROSS COUNTRY SKIERS  
WITH IMPAIRMENTS OF THE  
MUSCULOSKELETAL APPARATUS BASED  
ON A LONG-TERM FOLLOW-UP**

**Pastukhova I.V., Safonov L.V., Mashkovsky E.V.**

Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina (Russia).  
2018. V. 52. № 2. P. 69–76

*The investigation was focused on analysis of performance and functional capabilities of the body energy systems in Russian winter paralympic team members with*

*musculoskeletal impairments (MPI) competing in biathlon and cross-country skiing.*

*The purpose was to establish the dependence of paralympic athlete fitness on the period of pre- and post-Olympic training, and to evaluate effectiveness of the recovery period thereupon.*

*Physiological profiles were obtained as a result of incremental load tests until failure. Sit- and standing-skiers showed upward trends in their performance comparable with those of usual skiers. Physical performance of athletes with impairments affecting the upper limbs was comparable with the results of essentially healthy athletes and had a minimal number of factors limiting a further growth of abilities. Analysis of the sit-skiers data showed a lowered level of general physical fitness excused by more severe disabilities and, consequently, more numerous factors limiting the abilities development. However, growth of the aerobic capacity by 11.6 % during the recovery period in 2014 points to the potentiality of this group of athletes to improve endurance.*

*Key words: paralympic athletes, overtraining, physical fitness, musculoskeletal impairment, cyclic sports, performance.*

---

---

Редколлегия журнала сердечно поздравляет  
с юбилейными датами сотрудников ИМБП:

*Бакаринова Алексея Николаевича*

*Валикову Ираиду Алексеевну*

*Григорьева Анатолия Ивановича*

*Ермакову Ирину Сергеевну*

*Королеву Марину Викторовну*

*Щипанову Нину Владимировну*

Добрые вам пожелания и плодотворной работы!